



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Departamento de ingeniería ambiental



**ANÁLISIS COMPARATIVO AMBIENTAL DE LA FACTIBILIDAD DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON Y SIN REJUVENECEDOR**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Ambiental.

POR: Catalina Estefanía Muñoz Águila

Profesor Guía: Yannay Casas Ledon

Profesor Co-Guía: José Luis Concha Fuentealba

Concepción, 20 de marzo del 2024

“ANÁLISIS COMPARATIVO AMBIENTAL DE LA FACTIBILIDAD DE PAVIMENTOS ASFALTICO CON Y SIN REJUVENECEDOR”

Profesor Guía: Dra. Yannay Casas Ledón

Profesor Co-Guía: Dr. José Concha Fuentealba

Profesor Comisión: Dr. Ricardo Figueroa Jara



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis amigos, quienes son parte muy importante en mi vida y me han brindado su apoyo y amor tanto emocional como físico en todo momento. Sus palabras de ánimo y sus discusiones enriquecedoras han sido una fuente constante de motivación y de desarrollo personal. Ellos han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas y ser la persona que soy hoy. Gracias especiales desde el alma a Camila Godoy Agüero, Alexis Lebtún Zamorano y Ricardo Mizunuma Galmés por ser mis pilares.

No puedo pasar por alto el amor incondicional de mi madre Claudia Águila Rodríguez, quien, en estos últimos años, le debo todo por estar conmigo, por su ayuda y su apoyo en las etapas complejas de la vida.

Quiero extender mi gratitud a mi docente guía Yannay Casas Ledon, por su orientación, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este proyecto. Su sabiduría y experiencia fueron fundamentales para dar forma a este trabajo y para ayudarme a superar los desafíos que encontré en el camino.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a el Proyecto FONDEF IdeA ID 21I10127, ANID/FONDAP/15130015 y ANID/FONDAP/1523A0001. Sin su colaboración, este trabajo no habría sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	11
2 MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	13
2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS.....	17
2.3 AGRIETAMIENTO DE LAS CARRETERAS.....	20
2.4 TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO VIAL.....	25
2.5 TECNOLOGÍA DE REJUVENECEDORES.....	30
2.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	39
2.7 APLICACIÓN DE ACV EN REJUVENECEDORES IMPLENENTADO EN ASFALTO.....	42
3 HIPÓTESIS.....	44
4 OBJETIVOS.....	44
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	44
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
5 METODOLOGÍA.....	45
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	46
5.2 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO CON Y SIN REJUVENECEDOR.....	48
5.3 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE.....	48
5.4 UNIDAD FUNCIONAL (UF).....	49
5.5 LÍMITES DEL SISTEMA.....	49
5.6 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	55
5.7 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.....	65
5.8 COMPARATIVA AMBIENTAL DE LA FACTIBILIDAD DEL REJUVENECEDOR DE ASFALTO CON RESPECTO AL ASFALTO CONVENCIONAL.....	67
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO AMBIENTAL DE UNA CARRETERA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO CON Y SIN REJUVENECEDOR.....	68
7 CONCLUSIONES.....	83
8 REFERENCIAS.....	85
9 ANEXO.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. A. Estructura del pavimento rígido. B. Transmisión de cargas en pavimentos rígidos.	14
Figura 2. A. Estructura del pavimento flexible. B. Transmisión de cargas en pavimentos flexibles.	15
Figura 3. Tipos de deterioros superficiales de pavimentos asfálticos.	23
Figura 4. Técnicas de mantenimiento vial para pavimentos asfálticos.	28
Figura 5. Tipos de rejuvenecedores en el mercado, ejemplos de rejuvenecedores y su origen.	35
Figura 6. Funcionamiento del rejuvenecedor de asfalto proveniente de aceite pirolítico de neumático minero.	38
Figura 7. Acciones para desarrollar un ACV.	46
Figura 8. Mapa de la carretera Autopista Concepción – Cabrero.	47
Figura 9. Límites establecidos para la carretera de pavimento flexible convencional (sin rejuvenecedor).	50
Figura 10. Límites establecidos para la carretera de pavimento flexible con rejuvenecedor.	51
Figura 11. Comparativa entre los impactos totales de un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.	69
Figura 12. Perfil ambiental de la contribución de cada etapa del ciclo de vida de un pavimento asfáltico con la adicción de un rejuvenecedor de asfalto.	72
Figura 13. Comparativa de las ponderaciones de las categorías de impacto para un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.	74
Figura 15. Comparación entre las etapas del ciclo de vida.	77
Figura 16. Comparación de etapas del ciclo de vida dentro de las categorías de daño.	79
Figura 14. Comparativa de las contribuciones de cada categoría de impacto dentro de la puntuación total de daño para un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de carreteras según la velocidad de proyecto.....	19
Tabla 2. Fallas típicas de pavimento asfáltico y su causa.....	23
Tabla 3. Técnicas de mantenimiento para pavimentos asfálticos y el tipo de operación de mantenimiento.	28
Tabla 4. Técnicas de mantenimiento de carreteras para cada escenario.	63
Tabla 5. Inventario de fases del ciclo de vida.....	64
Tabla 6. Resumen de las categorías de impacto que abarca la metodología ReCiPe 2016.	66
Tabla 7. Técnicas de mantenimiento de carreteras para cada escenario.	71
Tabla 8. Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico convencional.....	94
Tabla 9. Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico con la adicción de un rejuvenecedor de asfalto.....	95

RESUMEN

La creciente conciencia ambiental y la imperativa necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en el ámbito de la infraestructura vial han impulsado la investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras, entre las cuales se destacan los rejuvenecedores de asfalto que desempeñan un papel fundamental en la infraestructura vial al restaurar la flexibilidad y resistencia del pavimento, prolongando así su vida útil y mejorando la seguridad vial. A pesar de su papel fundamental en la infraestructura vial, los pavimentos asfálticos tradicionales, en su proceso de construcción y mantenimiento, no está excepto de impactos ambientales.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en realizar un análisis comparativo ambiental de la factibilidad de pavimentos asfálticos, poniendo especial atención en la inclusión de rejuvenecedores en la mezcla asfáltica. Para llevar a cabo esta evaluación, se empleó la herramienta de análisis de ciclo de vida, utilizando la metodología de Recipe 2016, incorporada en el software SimaPro V8.1. La recopilación y análisis de datos se llevaron a cabo para dos escenarios: pavimentos asfálticos convencionales (sin rejuvenecedor) y pavimentos asfálticos con rejuvenecedor, considerando una unidad funcional de 1 km de longitud de carretera construida y 4 etapas: extracción de materia prima, transporte de materiales, construcción de la carretera y operación (etapa donde se incluye el mantenimiento vial).

Los resultados del estudio indican que el escenario de pavimento asfáltico con rejuvenecedor tiene un menor impacto ambiental durante el ciclo de vida, aunque al analizar por etapas, durante la fase de construcción del pavimento asfáltico con la aplicación del rejuvenecedor de líquido pirolítico conlleva a un aumento en total del 5,25% en las tres categorías de daño (daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos) teniendo en primer lugar a la categoría de daño en la salud humana. Esto es debido a la adicción del rejuvenecedor considerando tanto su producción como su transporte. Sin embargo, el aspecto más significativo se presenta en la etapa operativa, que incluye el periodo de mantenimiento vial. En este punto, se identifica una reducción promedio del 30% en las categorías de daño (daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos) para el escenario con rejuvenecedor debido a la acción del rejuvenecedor, ya que logra disminuir el consumo de recursos (como el betún) para el mantenimiento de la carretera. Este hallazgo subraya la importancia de considerar el ciclo de vida completo al evaluar los pavimentos asfálticos, ya que, considerando el análisis de ciclo de vida se identifican las etapas críticas de los escenarios. Los resultados obtenidos ofrecen información valiosa para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial, destacando la necesidad de considerar no solo los aspectos constructivos, sino también los impactos a lo largo de la vida útil del pavimento.

ABSTRACT

The growing environmental awareness and the imperative need to adopt more sustainable practices in road infrastructure have driven the research and development of innovative technologies, among which asphalt rejuvenators play a crucial role. They restore the flexibility and resistance of pavement, thereby prolonging its lifespan and enhancing road safety. Despite their fundamental role, traditional asphalt pavements, during their construction and maintenance processes, are not exempt from environmental impacts.

In this context, the present study focuses on conducting a comparative environmental analysis of the feasibility of asphalt pavements, with special attention to the inclusion of rejuvenators in the asphalt mix. To carry out this assessment, the life cycle analysis tool was employed, using the Recipe 2016 methodology incorporated in SimaPro V8.1 software. Data collection and analysis were performed for two scenarios: conventional asphalt pavements (without rejuvenator) and asphalt pavements with rejuvenator, considering a functional unit of 1 km of constructed road and 4 stages: raw material extraction, material transportation, road construction, and operation (a stage that includes road maintenance).

The study results indicate that the asphalt pavement scenario with rejuvenator has a lower environmental impact throughout the life cycle. However, when analyzing by stages, the construction phase of the asphalt pavement with the application of the pyrolytic liquid rejuvenator leads to an overall increase of

5.25% in the three damage categories (human health damage, ecosystem damage, and resource damage), with human health damage being the most affected. This is due to the addition of the rejuvenator, considering both its production and transportation. Nevertheless, the most significant aspect arises in the operational stage, which includes the road maintenance period. At this point, an average reduction of 30% in the damage categories (human health damage, ecosystem damage, and resource damage) is identified for the scenario with rejuvenator, thanks to the rejuvenator's action, which reduces resource consumption (such as asphalt) for road maintenance.

This finding underscores the importance of considering the complete life cycle when evaluating asphalt pavements, as the life cycle analysis identifies critical stages in the scenarios. The results obtained provide valuable information for decision-making in road infrastructure projects, highlighting the need to consider not only construction aspects but also the impacts throughout the pavement's lifespan.

1 INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos desempeñan un papel vital en la infraestructura vial, siendo fundamentales para el desarrollo económico y social. Sin embargo, su construcción y mantenimiento tradicionales plantean desafíos ambientales significativos, generando emisiones de gases de efecto invernadero. Este dilema ha impulsado la exploración de tecnologías innovadoras, como los rejuvenecedores de asfalto, para mejorar la sostenibilidad. En este contexto, la presente investigación se centra en un análisis comparativo ambiental de la viabilidad de pavimentos asfálticos, examinando especialmente el impacto de los rejuvenecedores en su ciclo de vida, en este caso, un rejuvenecedor proveniente de líquido pirolítico.

Los estudios de rejuvenecedores de asfalto, específicamente el uso de líquido pirolítico se presenta como una posible solución para mitigar estos impactos ambientales. Estos rejuvenecedores no solo ofrecen propiedades autorreparadoras al asfalto, prolongando así la vida útil de las carreteras, sino que también tienen el potencial de reducir la dependencia de materiales vírgenes, minimizar, en este caso la generación de residuos de construcción y de neumáticos mineros, ya que el rejuvenecedor tiene origen en el proceso de

pirolisis de neumáticos mineros, y disminuir las emisiones asociadas con la construcción y el mantenimiento vial.

En Chile existe la Ley N°20.920, conocida como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (REP), donde los neumáticos constituyen uno de los residuos prioritarios contemplados en dicha legislación. Siendo así el desarrollo del rejuvenecedor del líquido pirolítico proveniente de neumáticos mineros fuera de uso contribuyente a esta ley con la reducción y reciclaje de los residuos generados por los vehículos mineros, en específico, los neumáticos mineros.

En este contexto, el análisis comparativo ambiental se convierte en una herramienta esencial para evaluar y comprender los impactos asociados con la adopción de rejuvenecedores en pavimentos asfálticos en comparación con las prácticas convencionales. Este estudio busca proporcionar una visión integral de la viabilidad ambiental de los pavimentos asfálticos mejorados con rejuvenecedores, considerando diferentes etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la operación y el eventual fin de vida útil. A medida que la sociedad avanza hacia un enfoque más sostenible en la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura, el análisis comparativo presentado en este estudio contribuirá al conocimiento que respaldan la toma

de decisiones informadas y la implementación de prácticas más ecológicas en el sector de pavimentos asfálticos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Las infraestructuras viales son esenciales para el desarrollo económico y social de los países, además de ser responsables de gran cantidad de las emisiones de gases de efecto invernadero generados en las etapas tanto de construcción como en el uso de la carretera (Elorrieta Mendoza, 2023).

De acuerdo con el informe del Ministerio de Obras Públicas (2022), la red vial nacional tiene una longitud total de 28.358,714 kilómetros, de los cuales 15.251,700 kilómetros corresponden a la red vial de asfalto y 1.742,475 kilómetros a la red vial de hormigón. Es importante mencionar que la red vial nacional se compone de tres categorías: Red Vial Pavimentada, Soluciones Básicas y Red Vial No Pavimentada.

Existen dos tipos principales de pavimentos utilizados en la construcción de carreteras, los pavimentos se dividen en pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. Además, se diferencian según su estructura y el material del cual están constituidos. Cada pavimento tiene un comportamiento distinto en respuesta a

la aplicación de cargas generadas por el tráfico vehicular. Ambos tipos de pavimento están compuestos por varias capas, con diferentes funciones y materiales específicos (Artemio, 2012).

En el caso de los pavimentos rígidos, se compone de tres capas sucesivas: la capa de subrasante, la capa de subbase y las losas de hormigón. Estos pavimentos distribuyen las cargas de manera uniforme sobre un área grande, lo que genera una baja tensión en la estructura. En cambio, los pavimentos flexibles se conforman de cuatro capas sucesivas: la capa de subrasante, la capa de subbase, la capa base y la carpeta asfáltica. Estos pavimentos son más deformables y absorben las cargas de manera horizontal, lo que genera una mayor tensión en la estructura (Miranda Rebolledo, 2010; Artemio, 2012).

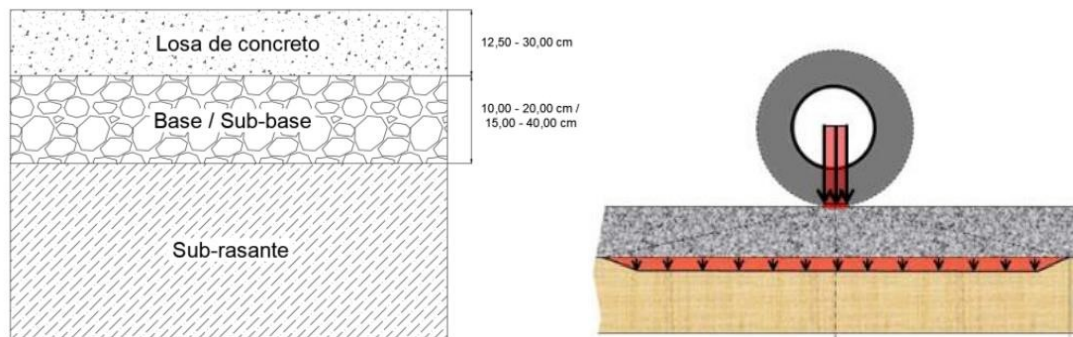


Figura 1. A. Estructura del pavimento rígido. **B.** Transmisión de cargas en pavimentos rígidos.

Fuente: Miranda Rebolledo (2010).

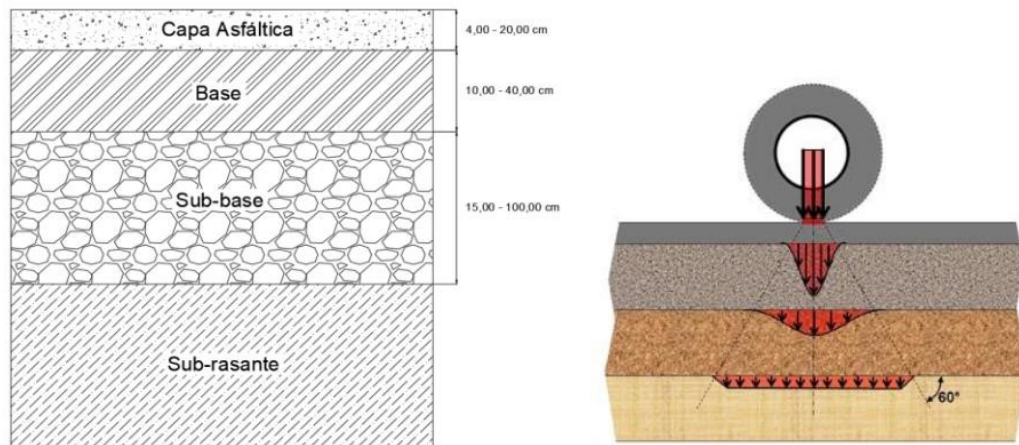


Figura 2. A. Estructura del pavimento flexible. **B.** Transmisión de cargas en pavimentos flexibles.

Fuente: Miranda Rebolledo (2010).

El asfalto es un mineral aglomerante de color oscuro, conformado por mezclas de hidrocarburos no volátiles, provenientes del petróleo crudo. Existen dos orígenes para el asfalto: origen natural o artificial, siendo el asfalto de origen natural los que provienen de yacimientos generados por acción volcánica, mientras que el asfalto artificial proviene de la destilación del petróleo crudo (Gutiérrez de López, L. 2003). Dentro de los asfaltos para pavimentos se subdividen en: cementos asfálticos, asfaltos cortados y emulsiones asfálticas (Miranda Rebolledo, 2010).

Las bases asfálticas según el origen el petróleo crudo, tienen una conformación de: base asfáltica (característica ligante y resistencia el envejecimiento), base parafínica (poco valor ligante) y base intermedia (Miranda Rebolledo, 2010).

El pavimento flexible presenta varias ventajas, como un bajo costo inicial y un tiempo de vida útil de 10 a 15 años. No obstante, presenta algunas desventajas, como la necesidad constante de mantenimiento y la producción de roderas y dislocaciones del asfalto ante cargas pesadas. Las roderas es la deformación de una o varias capas del firme causadas por las cargas de tráfico, altas temperaturas, ciclos de frío y calor y condiciones y diseño del firme, como el empleo de un ligante blando, una insuficiente compactación, mala calidad de los áridos o filler o una dosificación incorrecta de la mezcla. Además, en zonas de lluvia puede causar deslizamientos y las grietas y agrietamientos producidos por cambios de temperatura pueden generar agrietamiento por fatiga, lo que requiere tratamientos de mantención frecuentes al pavimento (como por ejemplo el sellado de grietas o la lechada asfáltica) que se mencionarán en la sección de técnicas de mantenimiento vial (Miranda Rebolledo, 2010). Se detallará más adelante que es el agrietamiento por fatiga.

Por otro lado, el pavimento rígido ofrece ventajas como la capacidad de reflejar la luz, lo que aumenta la visibilidad, y la ausencia de huellas. Además, es fácil proporcionar rugosidad y su rigidez favorece su durabilidad a largo plazo.

También es más liso que un pavimento asfáltico y puede soportar cargas de tráfico pesadas. El hormigón utilizado en este tipo de pavimento se endurece con el tiempo y tiene una vida útil de al menos 30 años, lo que frecuentemente supera la vida útil del diseño y las cargas de tráfico. Esto le otorga un mayor valor a largo plazo. Sin embargo, presenta algunas desventajas como el diseño del pavimento de hormigón requiere especial cuidado y su costo inicial es mucho más elevado que el del pavimento flexible (Miranda Rebolledo, 2010).

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS

La clasificación de las carreteras en Chile se encuentra constituida de dos partes: la clasificación administrativa y la clasificación funcional para diseño. La clasificación legal de los caminos públicos como clasificación administrativa, va aumentando la longitud de la red vial a medida que disminuye la jerarquía de las clases, entre estas clases se encuentran: caminos nacionales; caminos regionales principales; caminos regionales provinciales; caminos regionales comunales y caminos regionales de acceso (MOP, 2020).

La clasificación según su función responde a estándares de diseño, las cuales se clasifican como: carreteras y caminos. Para las carreteras encontramos las autopistas, autorrutas y primarias. Y para los caminos encontramos los colectores, locales y de desarrollo (MOP, 2020).

La función de las carreteras incluye altas velocidades de viaje destinado a viajes largos, una demanda de tránsito elevado, con varias pistas para un tránsito bidireccional o unidireccional de orden nacional o interregional, además tienen como objetivo evitar congestión, con accesos restringidos (MOP, 2018). La función de los caminos es dar acceso a la propiedad colindante, su zona de influencia es limitada y por ende volúmenes bajos de tránsito, su longitud de viaje suele ser corta. Mientras el promedio diario anual no supere los 150-250 vehículos/día, difícilmente requerirá pavimentación (MOP, 2020).

La clasificación de los factores que intervienen en una carretera o camino son de distinta naturaleza en diversos grados del diseño, estos factores son: factores funcionales, físicos, de costo asociado a la carretera, humanos y ambientales (MOP, 2020).

Los factores funcionales tienen relación con el servicio de la carretera como: función, volumen y características del tránsito, velocidad del proyecto y velocidad de operación deseable, seguridad para el usuario y comunidad circundante y relación con otras vías. Los factores físicos tienen relación con las condiciones de la naturaleza como: relieve, hidrología y geología y clima de la zona. Los factores de costo están relacionados con los estudios económicos de prefactibilidad y factibilidad del diseño. Finalmente, los factores humanos y ambientales se relacionan con las características de la comunidad que se

pretende servir y el medio ambiente en el que se encuentra, estos factores son: aspectos ambientales de impacto y mitigación, actividad de la zona de influencia, uso de la tierra adyacente e idiosincrasia de los usuarios y peatones (MOP, 2018).

Los métodos de diseño estructural de pavimentos permiten dimensionar el espesor de las capas que conforman el pavimento, el soporte de la acción de las cargas del tránsito y las condiciones climáticas durante el ciclo de vida de las carreteras. Actualmente en Chile se utiliza el método de diseño AASHTO-93 para el diseño estructural (Rodríguez Moreno et al., 2013). Para el diseño estándar de las carreteras o caminos, existe el Manual de carreteras, el cual brinda las instrucciones y los límites normativos para una obra vial, los cuales están determinados por: la categoría (le corresponde según su función); velocidad del proyecto; sección transversal (según categoría y velocidad del proyecto) y consideración de pavimento o solo capa de grava o ripio (MOP, 2018). En la tabla 1 se ilustran las categorías de clasificación de carreteras junto a las velocidades de proyecto.

Tabla 1. Clasificación de carreteras según la velocidad de proyecto.

CATEGORIA	VELOCIDAD DE PROYECTO (km/h)
------------------	---

AUTOPISTA	120 – 100 - 80
AUTORRUTA	100 – 90 – 80
PRIMARIO	100 – 90 – 80
COELCTOR	80 – 70 – 60
LOCAL	70 – 60 – 50 – 40
DESARROLLO	50 – 40 - 30

Fuente: Elaboración propia con información extraída de MOP (2020).

2.3 AGRIETAMIENTO DE LAS CARRETERAS

El proceso de deterioro de las carreteras está altamente influenciado por las cargas del tránsito, las condiciones ambientales del lugar, las propiedades mecánicas de los materiales, su desempeño estructural y los procesos constructivos (Rodríguez Moreno et al., 2013). Cabe destacar que la evolución del agrietamiento se debe a la interacción entre sí de los procesos anteriormente mencionados.

Se llevó a cabo un estudio en Chile para evaluar la probabilidad de agrietamientos en pavimentos flexibles utilizando como base un modelo de agrietamiento estructural llamado HDM-4. El HDM-4 es una herramienta analítica diseñada para llevar a cabo la evaluación técnica, económica y de mantenimiento de carreteras (Ministerio de Obras Públicas, 2020). Este modelo permite evaluar tanto la condición funcional como estructural de una carretera

durante un ciclo de vida de 25 años. La condición funcional se encarga de evaluar características operacionales (condiciones de uso y cargas vehiculares) y el estado de la superficie del pavimento, mientras que la condición estructural evalúa el nivel del estado de la superficie de la carretera en que se encuentra la sección del pavimento (Rodríguez Moreno et al., 2013).

Los resultados del estudio de Rodríguez Moreno et al., 2013, indican que hay tendencias de probabilidad de agrietamiento de las carreteras en las distintas zonas de Chile. Los factores que contribuyen al agrietamiento de las carreteras, tales como la exposición a los rayos UV, la temperatura elevada, la carga de tráfico, la presencia de derrames de líquidos y las precipitaciones, entre otros, provocan una alteración en las propiedades de los materiales asfálticos con el paso del tiempo, acelerando así el proceso de envejecimiento del pavimento (Súrfax, 2018).

Para pavimentos asfálticos los tipos de deterioros presentes en una estructura son las fisuras y grietas, deterioro superficial y otros deterioros. Cada una de estas categorías se encuentra ilustrada en la figura 3.

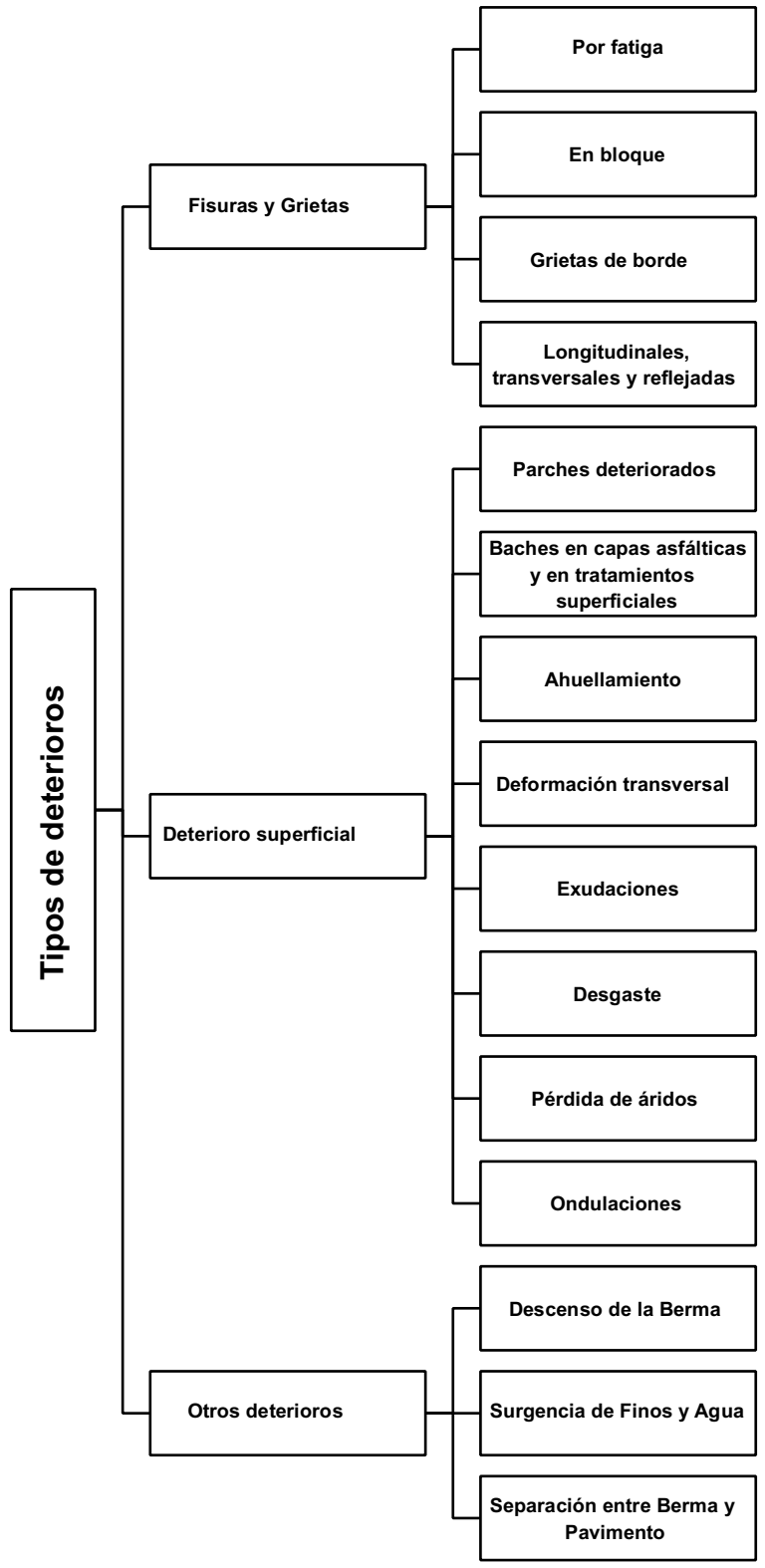


Figura 3. Tipos de deterioros superficiales de pavimentos asfálticos.

Fuente: Miranda Rebolledo (2010) y Ministerio de Obras Públicas (2014).

Para conocer más detalles sobre cada tipo de deterioro en ambos tipos de pavimentos, es recomendable revisar el Manual de Carreteras, Volumen 7: Mantenimiento Vial del año 2020 del Ministerio de Obras Públicas.

El deterioro de las capas flexibles presente en el componente del estado del pavimento se refleja a través de la progresión de las grietas, dando origen a los baches y el ahuellamiento superficial, siendo las grietas causadas por el tráfico y el clima, mientras que los baches son iniciados un tiempo después de la formación de grietas anchas o la pérdida de áridos (Ministerio de Obras Públicas et al., 1997). Las principales fallas que presentan los pavimentos asfálticos y sus causas se encuentran descritas en la tabla 2 ilustrada a continuación.

Tabla 2. Fallas típicas de pavimento asfáltico y su causa

Fallas típicas de pavimento asfáltico	Causa	Reparación
Grietas por fatiga (piel de cocodrilo)	Cargas reiteradas	Sello o lechada asfáltica
Grietas en bloque	Cargas reiteradas, las grietas en bloque que son fisuras y grietas de 0,1 a 10 m2 causadas por diferencias térmicas	Sello o lechada asfáltica

Grietas de borde (forma de medialuna)	Cargas de tránsito cuando la base es débil	Reconstruir las bermas
Grietas longitudinales	Mala construcción de base (débil) y contracciones térmicas	Sellado de grietas
Grietas transversales	Mala construcción de base (débil) y contracciones térmicas	Sellado de grietas
Baches (deformación en forma de taza)	Mezcla asfáltica mal dosificada. Presenta en caminos de alto tránsito y/o con problemas de drenaje	Bacheo superficial
Ahuellamientos (depresiones longitudinales)	Mezclas no compactadas suficientemente	Rellenar con mezcla asfáltica o fresado
Deslizamiento de la capa de rodadura	Frenadas y aceleradas de vehículos en zona de pendientes fuertes e intersecciones	Rellenar con mezcla asfáltica o bacheo (superficial/profundo)
Exudación (película de material betuminoso puro en la superficie del asfalto)	Mezcla mal diseñada con exceso de asfalto o insuficientes huecos	Sello o fresado en frío
Perdida de áridos (desgaste del pavimento)	Insuficiencia adherencia entre el ligante y el árido	Sello de riego niebla o lechada asfáltica
Afloramiento de agua	Carencia de drenaje	Resellar grietas
Ondulaciones	Tránsito donde base/subrasante son débiles o poco estables	Reemplazo de la capa asfáltica
Depresiones	Asentamiento de la base/subrasante	Nivelación de bermas
Bermas desniveladas y/o separadas	Asentamiento de la berma	Sellado de grietas

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Ministerio de Obras Públicas (2020).

2.4 TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO VIAL

El objetivo del mantenimiento en los pavimentos es recuperar el deterioro que han sufrido mediante obras puntuales y superficiales, con el fin de evitar que la severidad aumente. De esta manera, se logra mantener tanto las propiedades funcionales como las estructurales del pavimento en óptimas condiciones (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2020). Los mejores resultados de los mantenimientos viales se logran cuando se aplica en el momento oportuno, además un camino bien diseñado y construido, no debería requerir más mantenimiento que las operaciones de conservación rutinaria y periódica (Ministerio de Obras Públicas, 2020).

Las actividades para mantener y conservar el estado de la autopista se realizan mediante un conjunto de operaciones según su periodicidad como la conservación rutinaria, conservaciones periódicas y conservación eventual (Ministerio de Obras Públicas, 2020). La operación de conservación rutinaria se ejecuta durante el año (Ministerio de Obras Públicas, 2020) con operaciones como conservar, limpiar y verificar el buen funcionamiento de la carretera, tiene actividades como la limpieza de la faja y obras de drenaje, reparación y reemplazo de señales, reemplazo de barreras de contención, demarcación de pavimento, despeje de nieve, reparación de baches, perfilado de capa de rodadura granular, etc. (SOCIEDAD CONCESIONARIA COSTANERA NORTE

S.A., 2010). Mientras que las operaciones de conservación periódica se ejecutan en periodos mayores a un año determinadas por el tránsito y/o las condiciones meteorológicas, en donde se efectúan cambios parciales para corregir posibles fallas o prevenir daños mayores a causa del desgaste por el clima y tránsito, realizando operaciones de sellos asfálticos, reparación de defensas fluviales, reposición de losas de pavimentos de hormigón, colocación de alcantarillas o barras de contención, etc. (Ministerio de Obras Públicas, 2020). Finalmente, las operaciones de conservación eventuales se ejecutan de manera no recurrente durante el año como por ejemplo alguna emergencia, como un montaje de puentes modulares (Ministerio de Obras Públicas, 2020).

Además, las operaciones se pueden clasificar según su tipo de intervención en: operaciones de conservación de rehabilitación y de reposición. En pocas palabras, las operaciones de conservación de rehabilitación evitan el deterioro de la carretera devolviéndola a su condición inicial o las reforzándola como por ejemplo las nivelaciones de bermas, los ellos, los tratamientos superficiales, etc. Mientras que las operaciones de conservación de reposición renuevan de manera parcial o total las obras destruidas o que hayan cumplido su vida útil como, reposición de señales o losas de pavimentos (Ministerio de Obras Públicas, 2020).

Para un buen plan o gestión de mantenimiento de una carretera, requiere de identificar los tipos de fallas presente mediante recolección de información mediante inspecciones visuales y categorizarlas según su severidad alta (intervenir de inmediato), media (programar intervención a corto plazo) o baja (aviso que en un futuro se debe intervenir) para definir las acciones adecuadas para el mantenimiento vial (Ministerio de Obras Públicas, 2020).

La siguiente figura (figura 4) muestra algunas de las técnicas de mantenimiento vial para pavimentos asfálticos y rígidos ampliamente empleadas en Chile. Mientras que en la tabla 3 se encuentran algunas de las técnicas de mantenimiento vial de la figura 4 con su respectiva clasificación de operación de mantenimiento.

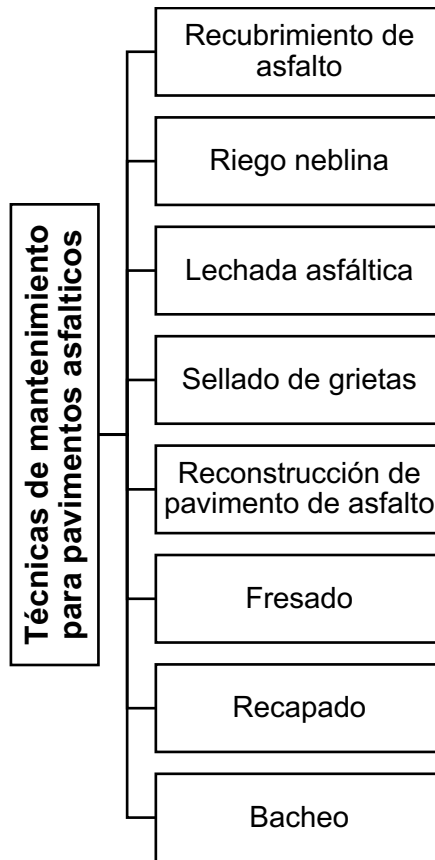


Figura 4. Técnicas de mantenimiento vial para pavimentos asfálticos.

Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2020) y Thenoux et al. (2007).

Tabla 3. Técnicas de mantenimiento para pavimentos asfálticos y el tipo de operación de mantenimiento.

Técnicas de mantenimiento para pavimentos asfálticos	Clasificación de operaciones de mantenimiento
Sellos bituminosos o recubrimiento de asfalto (riego asfáltico, solo o	Rutinaria / Periódica

combinado con agregado	
Tipos de sellos: riego neblina, lechada asfáltica, microaglomerado en frío, sello de agregado, sello localizado con gravilla y sello localizado con lechada.	
Riego neblina	Periódica
Lechada asfáltica	Periódica
Sellado de grietas (m)	Rutinaria
Reconstrucción de pavimento de asfalto	Periódico
Fresado	Periódica
Bacheo (superficial/profundo) (m2)	Rutinaria

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Ministerio de Obras Públicas (2020).

Por otro lado, existe otra técnica de mantenimiento vial que es la implementación de rejuvenecedores de asfalto. Desde la década de 1960, los rejuvenecedores han sido utilizados debido a sus beneficios para prolongar la vida útil del pavimento y reducción de costos de mantenimiento a largo plazo (National Center for Asphalt Technology, 2014). Sin embargo, no se encontró información sobre estudios sobre la aplicación en pavimentos asfálticos de estos rejuvenecedores en Chile hasta la fecha.

2.5 TECNOLOGÍA DE REJUVENECEDORES

Desde la década de 1960, los rejuvenecedores han sido utilizados como una técnica para conservar y restaurar las propiedades físicas y químicas de los ligantes asfálticos envejecidos en los pavimentos como la relación de asfaltenos/maltenos, con el potencial de prolongar su vida útil. Sin embargo, no se sabe con exactitud cuántos años más prolonga la vida útil de la carretera, debido a que depende tanto de las condiciones climáticas de la carretera como del origen y la calidad de cada rejuvenecedor (Garcia et al., 2010; National Center for Asphalt Technology, 2014). Estos rejuvenecedores se han aplicado en carreteras tanto en el reciclado in situ en caliente (mezcla a altas temperaturas) como en frío (mezcla a bajas temperaturas).

La utilización de rejuvenecedores ha demostrado ser una estrategia efectiva para revertir los efectos del envejecimiento en los ligantes asfálticos y restaurar sus características deterioradas. Al aplicar rejuvenecedores, se busca restablecer la flexibilidad, adhesividad y cohesión del ligante, mejorando su capacidad para resistir el agrietamiento y otros daños ocasionados por el tráfico y las condiciones climáticas. La aplicación de rejuvenecedores resulta especialmente relevante en el reciclado de mezclas asfálticas con un alto porcentaje de material reciclado, ya que estos ligantes pueden presentar un mayor grado de envejecimiento. La evaluación actual se centra en comprender

el impacto de los rejuvenecedores en la mejora de la resistencia al agrietamiento de estas mezclas, con el fin de fortalecer su durabilidad y rendimiento a largo plazo. Las investigaciones en curso están enfocadas en desarrollar y optimizar las técnicas de rejuvenecimiento, buscando encontrar la combinación adecuada de rejuvenecedores y procesos de aplicación que maximicen los beneficios y extiendan la vida útil de los pavimentos. Este enfoque contribuirá a promover una infraestructura vial más resistente y sostenible (National Center for Asphalt Technology, 2014).

Existen diferentes tipos de rejuvenecedores en el mercado, estos rejuvenecedores contienen una elevada proporción de componentes malteados (National Center for Asphalt Technology, 2014). La gran mayoría de los rejuvenecedores que son utilizados para producir asfalto corresponden a aditivos líquidos, esencialmente aceites con concentraciones significativas de maltenos. Los maltenos peptizan los asfaltos insolubles que tienden a presentarse en altas concentraciones en el betún oxidado (el betún oxidado se refiere a la degradación y oxidación de la capa de asfalto de la carretera que ha sido expuesta a la intemperie) (Guduru, G. et al, 2021).

Según el estudio realizado por Guduru, G. en 2021, se evaluó la eficiencia de 5 rejuvenecedores con mezcla de alto contenido de RAP (pavimentos asfálticos regenerados) en la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga de la mezcla. Los

cinco rejuvenecedores estudiados fueron el aceite de motor lubricante usado (a base de petróleo), un producto comercial de aceite de motor usado (a base de petróleo), sebo, aceite vegetal usado (a base de aceites orgánicos) y aceite alto crudo (aceite de palma crudo). La eficiencia de cada rejuvenecedor se evaluó comparando las características del betún y de las mezclas con la dosis objetivo de rejuvenecedor. Los resultados del estudio concluyen que el sebo y el aceite lubricante de motor usado mostraron una buena resistencia a la fatiga. Además, se menciona que la selección de un rejuvenecedor con ácidos grasos como componente principal puede mejorar la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga en comparación con las mezclas de asfalto virgen (Guduru, G. et al, 2021).

Otro estudio de investigación de resistencia de envejecimiento del betún rejuvenecido con rejuvenecedores abarcó cinco categorías para diferentes tipos de rejuvenecedores en función de la fuente y su disponibilidad presentadas por el Centro Nacional de Tecnología de Asfalto, estas categorías son: aceites parafínicos (aceite de motor lubricante usado y otro tipo de aceite usado), triglicéridos y ácidos grasos y tall oils (subproductos de aceite alto crudo o aceite vegetal usado). En el estudio la eficacia de los rejuvenecedores se determinó la dosis objetivo, la verificación de la relación de la primera fase con las mezclas producidas con betún recuperado de Rap y evaluación de la resistencia al envejecimiento de las mezclas de betún de RAP con los rejuvenecedoras. Se llegó a la conclusión de que la categoría de aceite tall oil y ácidos grasos son

más eficientes para ablandar el betún envejecido que los aceites parafínicos (Kumara, C. et al, 2022).

El aceite usado (WO) se divide en tres categorías, aceite de cocina, de motor y de biomasa. En el aceite de cocina se encuentra el aceite de cocina usado, vegetal usado, de fritura etc. El aceite de motor se refiere a los utilizados en motores de automóviles y el aceite de biomasa se refiere a los aceites provenientes de residuos y subproductos agrícolas y forestales como bio-oil, madera, residuos de animales, etc (Yan et al., 2022). El aceite usado puede mejorar la vida al desgaste por fatiga, restaurar las características a la adherencia, restaurar propiedades físicas del asfalto envejecido disminuir las propiedades a alta temperatura y aumenta las propiedades a baja temperatura (Yan et al., 2022).

Según el estudio de Ahmed y Hossain (2020), el aceite de cocina usado (WCO) proveniente de actividades después de cocinar (frituras) contiene componentes similares a los del asfalto que permiten dependiendo de la dosis, recuperar la resistencia al ahuellamiento de un ligante envejecido a altas temperaturas, aumenta la resistencia a bajas temperaturas y registran una resistencia al agrietamiento por fatiga. Un estudio realizado en China utilizó microcápsulas de una membrana de cáscara usando un prepolímero de metanol melamina

formaldehído (MMF) para incorporar el rejuvenecedor al asfalto (Ahmed & Hossain, 2020).

En el mercado, se encuentran disponibles cinco tipos de rejuvenecedores categorizados por la National Center for Asphalt Technology (NCAT), los cuales se describen en la figura 5. Sin embargo, no se describe el método de obtención de estos rejuvenecedores.

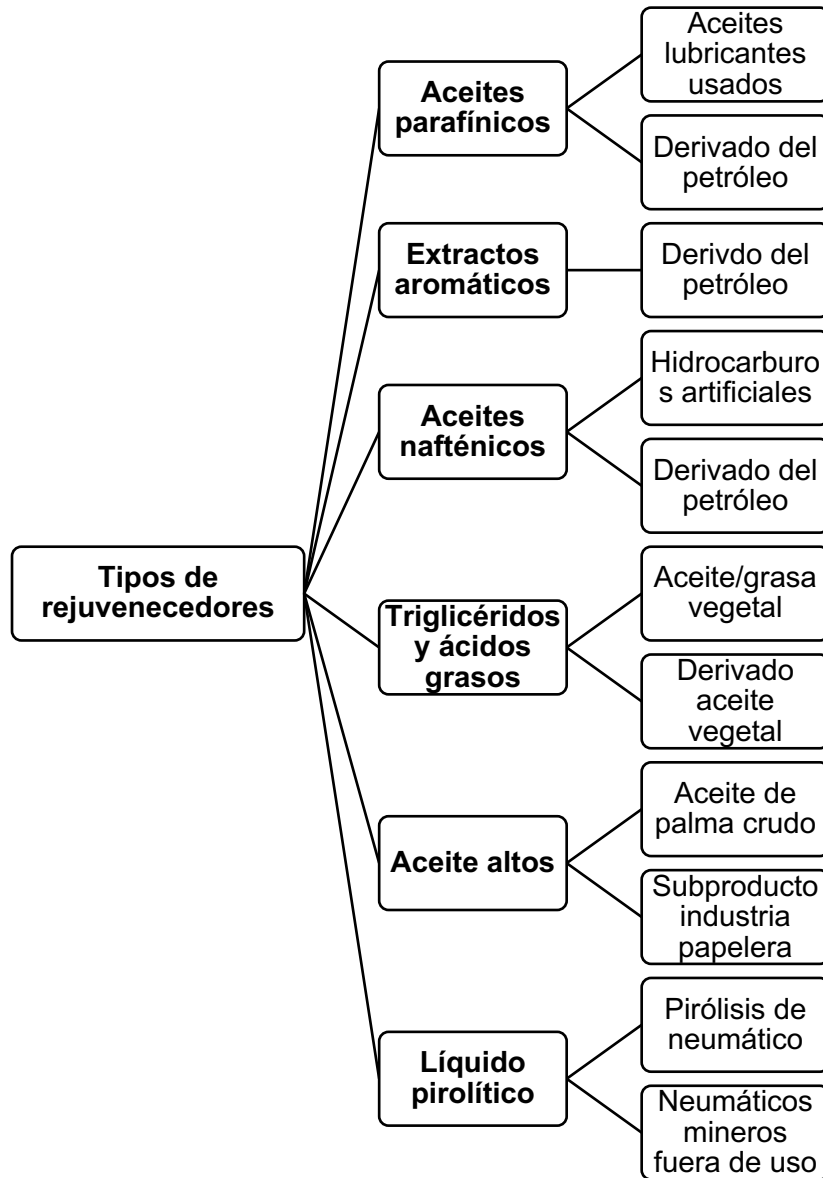


Figura 5. Tipos de rejuvenecedores en el mercado, ejemplos de rejuvenecedores y su origen.

Fuente: National Center for Asphalt Technology (2014); Norambuena-Contreras et al. (2021).

Sin embargo, el estudio de Rajib et al. (2020b) investigó cual es la eficacia como la durabilidad de los rejuvenecedores para revitalizar las propiedades del asfalto envejecido, debido a que no todos los rejuvenecedores restauraban todas las propiedades del asfalto envejecido para que vuelvan a ser como un asfalto virgen (recién construido), ya que dependía de la fuente de origen del rejuvenecedor. Por otro lado, los rejuvenecedores de base biológica provenientes de residuos de madera podría resultar ventajosa debido a su reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una menor contaminación por residuos (Behnood, 2019; Zhang et al., 2018).

Para la aplicación de estos rejuvenecedores en el asfalto se está proponiendo un encapsulamiento los rejuvenecedores, debido a que pueden ser peligrosos para el medio ambiente y además puedan mezclarse con los compuestos del asfalto, con la finalidad de que las cápsulas puedan romperse y liberar el rejuvenecedor a una mayor penetración al momento de alcanzar cargas de fatiga (Garcia et al., 2010). Se han utilizado técnicas de encapsulación como cápsulas de alginato de calcio, fibras de alginato, microcápsulas de melamina-formaldehído, cápsulas de epoxi, microcápsulas de poliuretano/urea-formaldehído (Xu et al., 2021).

El mecanismo de las microcápsulas para la autoreparación del asfalto consiste en que, al momento en que aparecen las grietas y se encuentran con la

microcápsula, ésta se rompe liberando el rejuvenecedor, limitando el crecimiento de las grietas humedeciendo la superficie de las grietas, se difunde y se ablanda (Xue et al., 2017; Xu et al., 2021).

Hasta la fecha las cápsulas con agentes rejuvenecedores se dividen en dos: un núcleo poroso de arena impregnado de aceite, recubierto por una cáscara dura de relleno y epoxi, con un tamaño mayor a 100 μm y el segundo consiste en una gota de aceite rodeada por una cubierta polimérica resistente, con un tamaño inferior a 100 μm . Sin embargo, hay escasa información sobre cómo las condiciones ambientales influyen en sus propiedades y su capacidad para sanar fisuras térmicas (a bajas temperaturas) y bajo carga de fatiga (generada por fatiga) (Xue et al., 2017).

En Chile, el estudio de Norambuena-Contreras et al. (2021) investigó la elaboración un aceite pirolítico como un rejuvenecedor de asfalto mediante un proceso de pirólisis de neumáticos mineros. Este aditivo fue encapsulado en una matriz biopolimérica porosa de alginato sódico obtenido de algas pardas de baja densidad. De esta forma, el aceite pirolítico, derivado del proceso de pirólisis de neumáticos mineros, se alojó en las cavidades internas de la matriz de alginato mediante un método de gelificación iónica externa. Posteriormente, las cápsulas se incorporaron en la etapa de construcción del pavimento asfáltico, activándose mediante deformación de la matriz de alginato, tal como

se ilustra en la figura 6. El rejuvenecedor descrito en el párrafo anterior, será el rejuvenecedor a utilizar en esta investigación.

Una vez el líquido pirolítico ha sido liberado de la matriz de alginato, este rejuvenecedor tiene la capacidad de cerrar las microfisuras (restaurar el equilibrio entre asfaltenos / maltenos) por su alto contenido de maltenos, debido a que el envejecimiento del betún durante la operación de la carretera (vida útil) aumentan las concentraciones de asfaltenos provocando pérdida de movilidad y fragilidad, aumentando agrietamiento del betún.

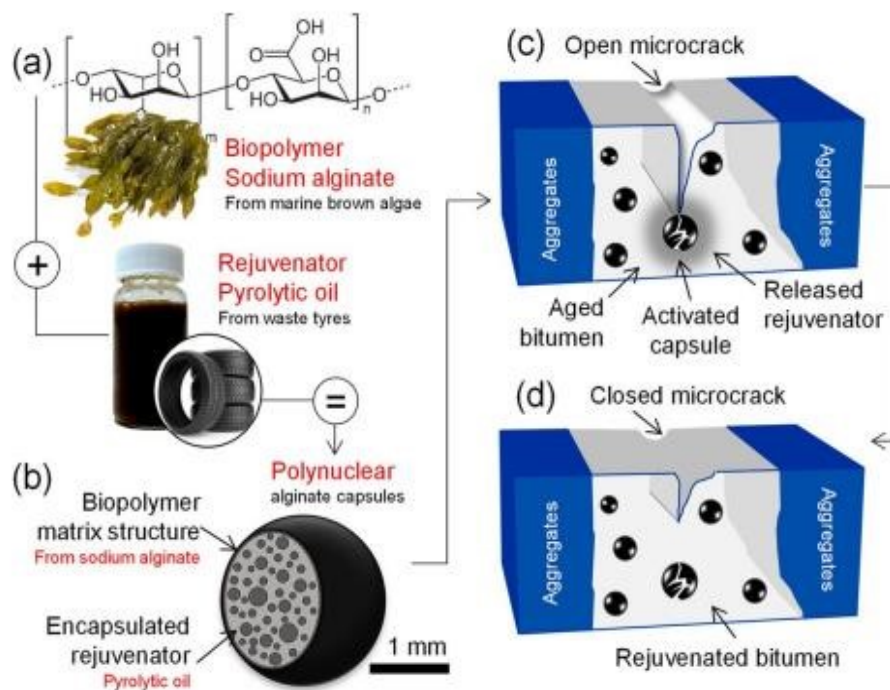


Figura 6. Funcionamiento del rejuvenecedor de asfalto proveniente de aceite pirolítico de neumático minero.

Fuente: Imagen extraída de Norambuena-Contreras et al. (2021).

2.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El análisis de ciclo de vida es una herramienta utilizada para evaluar el impacto ambiental de un producto, proceso o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, considerando todas las etapas de del ciclo de vida, desde el origen de la extracción de materias primas, el transporte, la fabricación, el uso y su disposición final luego de su vida útil. El ACV puede incluir aspectos ambientales como el consumo de energía, emisión de gases, la generación de residuos, etc. (ISO, 2006).

La normativa aplicable para un ACV se encuentra en la norma internacional ISO 14040, que define los principios y el marco de referencia para el análisis de ciclo de vida, mientras que la norma ISO 14044 establece los requisitos y directrices que deben tenerse en cuenta durante el proceso de análisis.

- Los principales aspectos que aborda la ISO 14040 se pueden encontrar:
- La fase de definición del objetivo y alcance del ACV.

- La fase de análisis de inventario de los datos implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir el objetivo.
- La fase de evaluación de impacto ambiental para proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida.
- La fase de interpretación, en la cual se resume y discuten los resultados del ACV (ISO, 2006).

Además de la ISO 14040, existen otras normas ISO asociadas al ACV como la ISO 14041 a la 43, las cuales presentan guías para determinar objetivos, llevar a cabo las fases de evaluación de impacto ambiental y la interpretación de resultados, sucesivamente (Farré i Ventura, M. 2013).

El análisis de ciclo de vida ofrece diversas potencialidades, entre las que se destacan la identificación de aspectos e impactos ambientales críticos que podrían mejorarse para reducir el impacto de un producto, proceso o servicio. Asimismo, el ACV puede contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de materia prima y recursos económicos, lo que a su vez puede mejorar la competitividad de una empresa en términos ambientales. Además, los resultados del ACV pueden orientar la toma de decisiones en cuanto a la innovación del diseño del producto o proceso para reducir su impacto ambiental. De manera similar, el ACV también promueve la transparencia en cuanto a los impactos ambientales

generados por el producto, proceso o servicio, lo que puede mejorar la confianza y la imagen de la empresa.

El análisis de ciclo de vida se ha aplicado en el sector industrial como también fuera del área industrial en el sector privado y público, con el objetivo de mejorar el impacto ambiental. Esta herramienta ha permitido comparar diferentes procesos de fabricación de un mismo producto, así como también comparar productos de diferente naturaleza, pero con aplicaciones similares y además de comparar las diferentes etapas del ciclo de vida de un mismo producto, lo que ha sido útil para identificar posibles áreas de mejora y reducir el impacto ambiental (Esperanza Haya, L, 2016).

El análisis de ciclo de vida se ha aplicado en diversas áreas, abarcando desde plantas de tratamiento de aguas residuales (Rodríguez et al., 2018) hasta el sector minero (García et al., 2017), la gestión de residuos sólidos urbanos (Ayala & Hansen, 2020), la producción de cemento (De Cea Antonio, 2001), la industria de alimentos, la producción de biodiesel (Rodríguez et al., 2019) y el sector energético que incluye hidroeléctricas (Vallejo et al., 2022), energía eólica e hidráulica (Fabián & Sánchez Relaño, 2018), sistemas de energía solar fotovoltaica (Pereira, 2022) y plantas termoeléctricas (Roberto, 2014). Además, el análisis de ciclo de vida también se ha utilizado en el campo de los pavimentos asfálticos (Martínez, C.A, 2015; Elorrieta Mendoza, A. A. (2023)).

2.7 APLICACIÓN DE ACV EN REJUVENECEDORES IMPLENENTADO

EN ASFALTO

La información disponible en línea sobre los rejuvenecedores de asfalto es limitada. Se encontró un estudio que aborda el uso de pavimentos asfálticos regenerados (RAP) con rejuvenecedores. En el estudio de Abdalla et al. (2022), se evaluó el potencial medioambiental de la utilización de tres diferentes materiales reciclados (RAP, OFA (cenizas volantes fuera de especificación) y FWBO (rejuvenecedor de bioaceite de residuos alimentarios)) en sustitución de materiales vírgenes utilizados con el HMA (mezcla asfáltica en caliente) convencional a través de un ACV comparativo. El estudio concluyó que la técnica utilizada para el proceso de producción del rejuvenecedor FWBO, técnica que utiliza n-hexano como disolvente de extracción, tuvo una influencia dominante en todos los impactos ambientales analizados como la ecotoxicidad, eutrofización y agotamiento de la capa de ozono. Se recomienda utilizar otras técnicas como pirólisis, licuefacción hidrotérmica y extracción asistida por ultrasonidos para reducir la influencia negativa en los impactos ambientales durante la producción del rejuvenecedor (bioaceite) con el uso del disolvente n-hexano como técnica para la extracción del rejuvenecedor si se pretende una producción en masa.

El estudio de Rodríguez-Alloza, et al., 2019, realizó un análisis híbrido (datos económicos y datos de emisiones) de ciclo de vida sobre una carretera convencional con un ciclo de vida de 30 años y una carretera autorreparable con un ciclo de vida de 45 años. La carretera autorreparable fue mediante calentamiento por microondas con escorias de acero como árido para el asfalto nuevo, llegando a la conclusión de una reducción de emisiones, energía y costos. La carretera autorreparable presentó una reducción de emisiones de un 16% y una reducción de costo de 32% en comparación a una carretera convencional.

Sin embargo, al tratarse de procesos nuevos, aún no existen estudios ambientales que evalúen la efectividad de la implementación de los rejuvenecedores en las carreteras ni que permitan comparar los impactos ambientales de dicha implementación con respecto a una carretera de asfalto tradicional (sin rejuvenecedor).

Aunque la implementación del rejuvenecedor de asfalto proveniente de neumáticos mineros tiene como objetivo evitar o reducir la necesidad de mantenimiento vial, aún no se ha determinado si los recursos requeridos para producir y aplicar el rejuvenecedor compensan los beneficios esperados (evitar o reducir) en la etapa de mantenimiento. Por lo tanto, es necesario identificar y categorizar los impactos ambientales asociados con la producción e

implementación del rejuvenecedor, así como los impactos de una carretera de asfalto sin rejuvenecedor. De esta manera, se podrá determinar cuál de los dos enfoques presenta un mayor o menor impacto ambiental.

3 HIPÓTESIS

¿La implementación del rejuvenecedor de asfalto proveniente de líquido pirolítico de neumáticos mineros tendrá un menor impacto ambiental en comparación con los impactos ambientales de una carretera de asfalto tradicional sin rejuvenecedor?

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los impactos ambientales de la factibilidad de un rejuvenecedor de asfalto proveniente de líquido pirolítico de neumáticos mineros en un pavimento asfáltico durante su ciclo de vida.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Elaborar un inventario del ciclo de vida de un pavimento asfáltico con y sin rejuvenecedor.
2. Evaluar los impactos ambientales asociados a la factibilidad del rejuvenecedor de asfalto durante su ciclo de vida.
3. Comparar los impactos ambientales resultantes de la factibilidad del rejuvenecedor de asfalto con respecto al asfalto convencional.

5 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la evaluación de impactos ambientales de la implementación de un rejuvenecedor de asfalto proveniente de aceites pirolíticos de neumáticos mineros en un pavimento de asfalto, comparado con un pavimento de asfalto tradicional (sin rejuvenecedor), se utilizará la metodología de análisis de ciclo de vida. En el capítulo anterior, se mencionaron las fases que se seguirán para desarrollar el presente informe, fases que conforman la metodología del ACV bajo los criterios de la norma ISO 14040:2006 representadas en la figura 7.

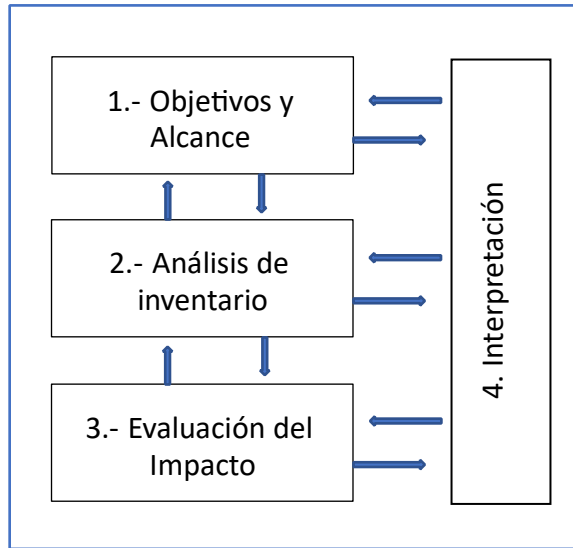


Figura 7. Acciones para desarrollar un ACV.

Fuente: ISO 14040/2006.

5.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a una carretera de referencia local llamada Autopista Concepción – Cabrero ubicada entre las comunas de Concepción, Florida, Yumbel y Cabrero en la región del Biobío, con una longitud de 72,3 kilómetros. Esta carretera se emplaza entre las regiones del Biobío y Ñuble. Comprende una doble calzada de 7 metros de ancho y dos piscas cada una en toda su extensión. Tiene un flujo vehicular promedio anual desde sus 5 años de servicio de 448.503 vehículos. Sin embargo, para el flujo vehicular mensual entre el año 2022 y 2023 fue de 486.908 vehículos, con un 78,25%

correspondiente a flujo de vehículos livianos y un 21,74% correspondiente a flujo de vehículos pesados.

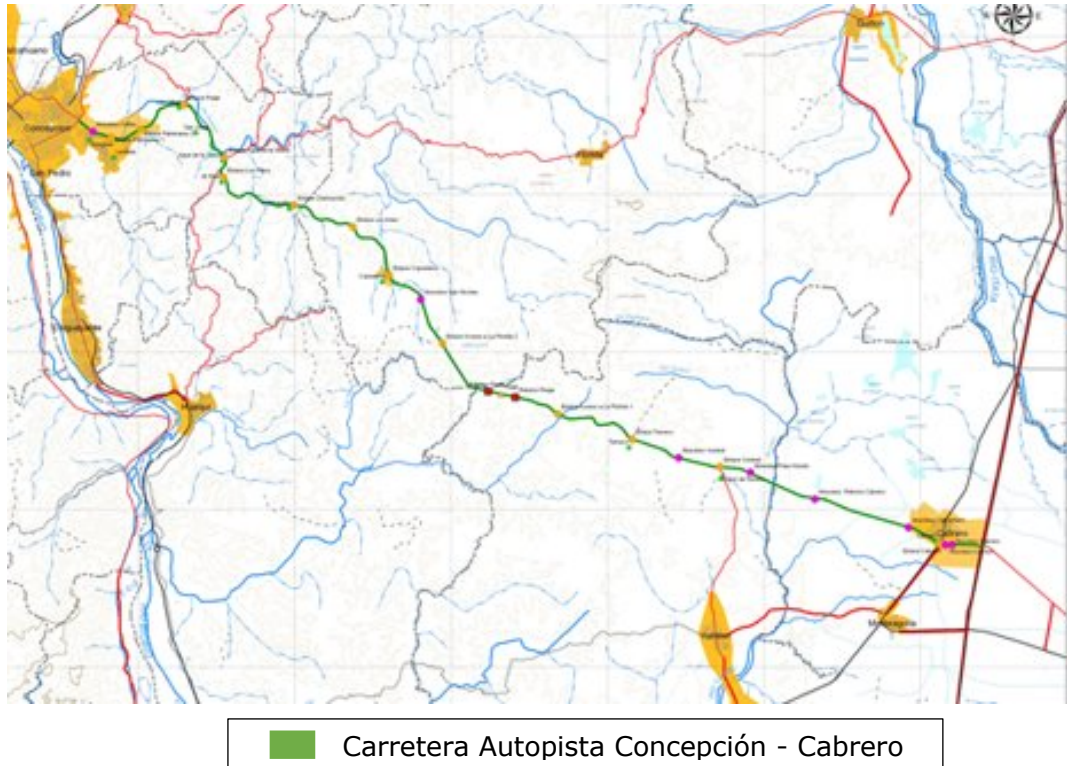


Figura 8. Mapa de la carretera Autopista Concepción – Cabrero.

Fuente: Imagen extraída de Sociedad Concesionaria Valles del Biobío S.A. (2010). Estudio de impacto ambiental.

5.2 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO

CON Y SIN REJUVENECEDOR

Para este objetivo, se procederá a definir tanto el objetivo 1 como el objetivo 2 de las acciones necesarias para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida conforme a lo establecido en la norma ISO 14040/2006. Se realizarán definiciones precisas del objetivo y alcance del estudio, la unidad funcional que se utilizará como referencia, los límites del sistema a ser considerados, el análisis del inventario y, finalmente, se construirá el inventario de fases de acuerdo con los límites del sistema previamente definidos.

5.3 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de presente trabajo es evaluar los impactos ambientales de la implementación de un rejuvenecedor de asfalto proveniente de líquido pirolítico de neumáticos mineros en un pavimento asfáltico durante su ciclo de vida. Además, se compararán dos escenarios: pavimentos asfálticos convencionales (sin rejuvenecedor) y pavimentos asfálticos con rejuvenecedor.

5.4 UNIDAD FUNCIONAL (UF)

En este estudio, se analizará implementación del rejuvenecedor pirolítico en una carretera de pavimento asfáltico como unidad funcional 1 kilómetro lineal (km) de superficie de asfalto. La función del rejuvenecedor es disminuir la periodicidad del mantenimiento vial en una carretera de asfalto, para este caso el mantenimiento de sellado con lechada asfáltica.

5.5 LÍMITES DEL SISTEMA

La ISO 144044/2006 establece los límites del sistema, los cuales permiten determinar los procesos unitarios dentro del ACV. En este estudio se definieron los límites del sistema desde la “cuna a la tumba” (es decir, desde la extracción de materia prima, transporte de materiales, construcción de la carretera hasta la operación de esta). En el presente estudio, se definirán dos sistemas que serán descritos a continuación con una vida útil de 30 años. La elección de una vida útil de 30 años es debido a que la vida útil de proyectos de una carretera de asfalto tiene una duración de proyecto entre 15 a 30 años dependiendo de la concesión de la carretera (Miranda Rebolledo, 2010).

- **Carretera de pavimento asfáltico convencional (sin rejuvenecedor):** En el sistema uno se consideran todas las etapas involucradas en la construcción de una carretera de asfalto de manera convencional representado en la figura 9, las cuales son extracción de materia prima, transporte de materiales, construcción y operación.
- **Carretera de pavimento asfáltico con rejuvenecedor:** En el segundo sistema se incluyen todas las etapas de construcción de una carretera de asfalto convencional, sin embargo, se integra la fase de producción del rejuvenecedor de asfalto durante la etapa de construcción como se observa en la figura 10.

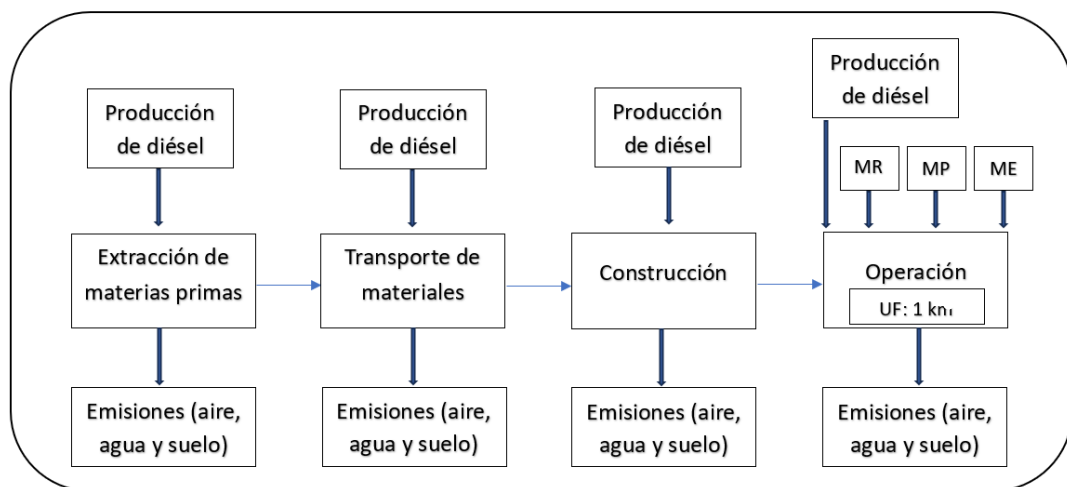


Figura 9. Límites establecidos para la carretera de pavimento flexible convencional (sin rejuvenecedor).

Fuente: Elaboración propia con información extraída Elorrieta Mendoza (2023).

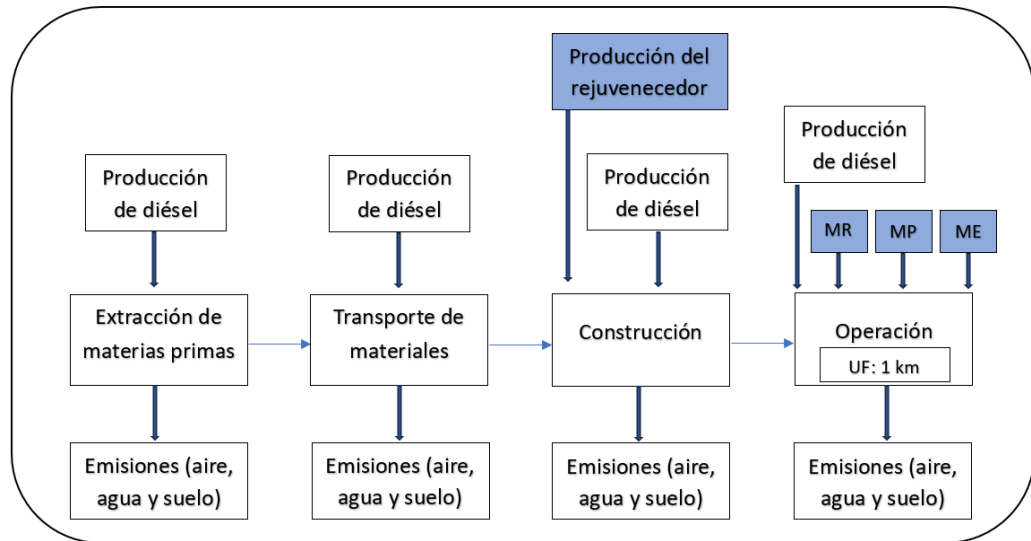


Figura 10. Límites establecidos para la carretera de pavimento flexible con rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración propia con información extraída Elorrieta Mendoza (2023).

El proceso de construcción de la carretera se compone de seis fases distintas: la extracción de materias primas, el transporte de materiales, la construcción propiamente dicha, la etapa de operación o uso, el mantenimiento y rehabilitación, y finalmente, el fin de la vida útil (Elorrieta Mendoza, 2023). Sin embargo, en este estudio se ha optado por reducir a cinco etapas, las cuales

son: la extracción de materias primas, el transporte de materiales, la construcción, la operación y el fin de la vida útil. Destacando que la etapa de mantenimiento y rehabilitación de la carretera se englobará dentro de la fase de operación.

La etapa de extracción de materias primas constituye la extracción de materiales esenciales para la construcción de la carretera de asfalto como: áridos, hormigón, asfalto, cemento, acero, etc. Se contempla como entrada de la producción de diésel, incluyendo el combustible necesario para la maquinaria utilizada en el transporte, así como el uso de lubricantes y aceites para el mantenimiento de dicha maquinaria, lo que, a su vez, implica salidas en forma de emisiones al aire, agua y suelo como resultado del consumo de energía y uso de lubricantes y aceites.

La etapa de transporte de materia prima constituye a el transporte de los materiales esenciales para la construcción de la carretera desde su lugar de origen, ya sea una planta de producción, una cantera, etc., hacia el lugar de construcción de la carretera. El transporte se ejecuta utilizando maquinaria pesada, lo que implica la producción de diésel en forma de combustible. A su vez, este consumo de diésel se espera que generen emisiones tanto al aire por el consumo de combustible por el tránsito de la maquinaria por caminos

pavimentados/no pavimentados y emisiones al agua y suelo por el mantenimiento de la maquinaria.

La etapa de construcción constituye las obras físicas para la construcción de una carretera de asfalto, lo que involucra actividades como el despeje de terreno, el movimiento de tierras, el procesamiento y almacenamiento de materiales e insumos, la instalación de faenas con sus respectivos suministros, la pavimentación, etc. Para todas estas actividades implica el uso de maquinaria pesada, vehículos livianos y herramientas, lo que espera que se generen emisiones al aire por consumo de combustible y emisiones por el transporte de insumos por caminos pavimentados/no pavimentados, movimiento de material, carga y descarga del material, además de emisiones al agua y suelo, ya sea en forma de residuos sólidos peligrosos como el uso de lubricantes y aceites para la mantención, residuos sólidos inertes como restos de pavimentos, restos de la limpieza del terreno, etc., o residuos sólidos domiciliarios generados por las faenas.

La etapa de operación constituye al uso de la carretera, la parte esencial de esta etapa es el mantenimiento vial que se subdivide en 3 categorías: mantenimiento rutinario, periódico y eventual, los cuales están descritos con mayor detalle en la sección 2.4. Sin embargo, únicamente se considerará el mantenimiento periódico en el presente trabajo. El mantenimiento rutinario

queda excluido, ya que el enfoque recae en el mantenimiento de sellado con lechada asfáltica que se explicará más adelante, clasificado como parte del mantenimiento periódico. Asimismo, el mantenimiento eventual no se tomará en cuenta, dado que no es posible contemplar la posibilidad de accidentes en la carretera y los daños que estos puedan ocasionar.

La aplicación del rejuvenecedor de asfalto tiene el fin de reducir la periodicidad del mantenimiento vial de sellado con lechada asfáltica que se realiza cada 5 años. Hasta el momento se tiene conocimiento de que, el rejuvenecedor después de los 10 años de su aplicación, aún continúa funcionando, sin embargo, aún no se conoce si hasta los 10 años quedan cápsulas activas.

La etapa de fin de vida útil constituye a la fase en la que la carretera llega al final de su vida útil el cual fue diseñada, algunas estrategias adoptadas son la recuperación de la carretera, demolición y retirada de materiales que pueden ser reciclados (M. S. Siverio Lima et al., 2021; Araúja et al., 2014; M. Zheng et al., 2021) o dejar la carretera in situ (Araúja et al., 2014). La aplicación del reciclado de la capa asfáltica con fresado (eliminación y reciclado de la capa asfáltica) se ejecuta en el fin de la vida útil del pavimento, donde el asfalto es transportado y reciclado en una planta de asfalto para tratarla y volver a generar una capa asfáltica, así prolongando la vida útil de la carretera (M. S. Siverio Lima et al., 2021; M. Zheng et al., 2021). Sin embargo, para este trabajo

no se considerará la etapa de fin de vida útil, debido a que el funcionamiento de las carreteras es de uso casi “infinito”.

5.6 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

El inventario de ciclo de vida (ICV) se lleva a cabo generando entradas y salidas en el sistema previamente definido. Este proceso implica recopilar datos relevantes de acuerdo con la norma ISO 14040/2006. Las entradas del ICV incluyen las materias primas utilizadas y la producción de diésel, mientras que las salidas se refieren a las emisiones atmosféricas, los residuos sólidos y líquidos generados. Para el desarrollo del ICV, fue necesaria una recopilación de información combinada de bibliografía, base de datos existente y datos específicos del caso de estudio relacionados con la entrada al sistema, donde se encuentran las materias primas empleadas en el sistema, teniendo en cuenta la cantidad y características específicas de cada material.

Dado que el área de estudio está actualmente operativa, los datos utilizados para elaborar el inventario y la simulación del ciclo de vida de la carretera de pavimento asfáltico, tanto con rejuvenecedor como sin él, fueron utilizados para desarrollar un escenario hipotético (referente a la construcción de la carretera) con el propósito de comparar la factibilidad ambiental del rejuvenecedor en el tiempo.

Para definir con más detalles el perfil ambiental, se requiere de hacer suposiciones, las cuales abarcan:

Los pavimentos asfálticos en Chile, el 90% de las carreteras corresponden a mezclas asfálticas semidensa de tipo IV – A – 12. Por lo cual para la carretera del caso de estudio se definirá como tal. En donde la capa asfáltica contiene en un 95,5% de áridos y un 4,5% de asfalto (Butt. et al 2014). Además, la carretera Autopista Concepción – Cabrero tiene un ancho por pista de 3,5 metros y un espesor de la capa asfáltica en promedio de 52,5 mm (Sociedad Concesionaria Valles del Bio Bio S.A., 2010).

Según el estudio de Valdebenito, C. (2011), se consideran los niveles de tránsito bajo con un tránsito medio diario anual (TMDA) de menos de 1000 vehículos al día y un nivel de tránsito medio – alto de un TMDA entre 1000 y 5000 vehículos al día. Por lo que, para la autopista Concepción – Cabrero que tiene un TDMA de 9100 vehículos/día y un TDMA de 1600 camiones/día, corresponde a un tránsito medio – alto tanto para vehículos liviano como para vehículos pesados. El inventario para escenario 1 (carretera de pavimento asfáltico convencional (sin rejuvenecedor)) la etapa de extracción de materias primas requiere dos materiales fundamentales para la construcción, siendo el material principal el árido. Los datos fueron obtenidos a partir de una Declaración de Impacto

Ambiental (DIA) de una cantera local, en dónde se obtuvo información de la cantidad de toneladas producidas, la ocupación de suelo, las emisiones al aire (excepto emisiones de CO₂) y la cantidad de residuos sólidos generadas por el proceso de extracción y procesamiento de áridos (Sacyr Chile S.A., 2011). Para toda esta información, fue necesario llevar la cantidad de toneladas a una unidad de referencia (1 tonelada de árido producida).

Sin embargo, como la DIA no tenía información acerca de la cantidad de material pétreo (roca) que se necesitó para producir la cantidad de toneladas totales de áridos del proyecto ni el consumo de combustible requerido para procesar los áridos (tanto para uso maquinaria como para grupos electrógenos) ni las emisiones de CO₂ generadas por el uso de la maquinaria, se requirió complementar la información a través de estudios similares. Por lo que, para la cantidad de materia pétreo (1,04 ton/ton árido) para producir 1 tonelada de áridos se rescató información de Estanqueiro. B et al, 2018, mientras que para la cantidad de consumo de combustible necesario para producir 1 tonelada de árido (14,53 kg diésel/ton árido) se obtuvo de Butt. et al 2014. Para las emisiones de CO₂, como la DIA no entregaba información del consumo de combustible, las emisiones de CO₂ al aire generadas por uso de maquinaria fueron calculadas a través de la Guía de la CONAMA para estimación de emisiones atmosféricas (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009) utilizando el consumo de combustible brindado por la fuente bibliográfica. Las

especificaciones del cálculo de emisiones se encuentran detalladas en anexo. Adicionalmente, se calculó las toneladas por kilómetro recorrido (tkm) de los residuos generados en el proyecto hacia el relleno sanitario Copiulemu cercano al caso de estudio con una distancia promedio de 15,2 km.

El segundo material fundamental es el asfalto, sin embargo, al no encontrar una DIA de una planta de asfalto local, la información para producir una tonelada de asfalto se extrajo de Stripple, H., 2001., la cual se rescató información completa del proceso. La producción de asfalto requiere como materia prima el árido y el betún, para el árido fue vinculada la información de etapa de extracción de áridos. Mientras que, para el betún, la información se obtuvo a través de la base de datos de Ecoinvent disponible en el Software profesional SimaPro versión V8.1.

La etapa de transporte de materias primas primero se ubicó mediante Google Earth Pro las plantas de áridos y plantas de asfalto más cercanas al caso de estudio para el cálculo de la distancia de las plantas hacia la carretera. Luego para el cálculo de las toneladas por kilómetro recorrido (tkm), se multiplicó la distancia (en kilómetros) por las toneladas requeridas de áridos y asfalto para producir 1 kilómetro de carretera por dos (ida y vuelta). Para el transporte de materiales en Chile, se utilizan camiones pesados de distinta capacidad, por lo que se designó un camión de transporte de materiales con una capacidad de

30 toneladas (establecido en el EIA del caso de estudio). Según la normativa chilena, se establece una tecnología para los camiones de EURO 4 (Del Congreso Nacional, s. f.), con esta información, se tuvo un criterio para seleccionar el tipo de transporte dentro del Software versión V8.1.

La etapa de construcción del pavimento asfáltico sin rejuvenecedor, la información se obtuvo a través del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del caso de estudio (Autopista Concepción- Cabrero) que fue la base para el desarrollo del inventario. La cantidad de material pétreo (para bases y subbase granulares), asfalto, emisiones al aire (excepto emisiones de CO₂ y SO₂) y residuos sólidos generadas por a la construcción fueron llevadas a la unidad funcional (1 kilómetro de longitud de carretera construida). Como la EIA no tenía información del consumo de combustible para maquinaria, este se obtuvo mediante pappers (Butt. et al 2014; Stripple, H., 2001.). Las emisiones de CO₂ fueron calculadas de la misma manera que se calcularon las emisiones de CO₂ para la producción de áridos.

La etapa de operación que incluye el mantenimiento vial se espera evitar el sellado bituminoso con lechada asfáltica de carácter periódico. El sellado bituminoso con lechada asfáltica tiene como objetivo principal la reducción del deterioro superficial causado por la oxidación del asfalto y la rigidez del pavimento, logrando así detener el proceso de envejecimiento de la mezcla. La

elaboración de la lechada se lleva a cabo en mezcladores continuos autopropulsados, incorporando los materiales necesarios. La aplicación de la lechada se realiza mediante una caja repartidora remolcada sobre la superficie a tratar, permitiendo la distribución continua de la lechada. Antes de aplicar el sellado, es imperativo realizar una limpieza exhaustiva del área utilizando barredoras mecánicas, aire o escobas manuales (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2020).

La determinación del momento en que comienzan a manifestarse las grietas en una carretera se aborda mediante la predicción de diversos deterioros, como el agrietamiento, la pérdida de áridos, el ahuellamiento y los baches. Esta evaluación se lleva a cabo a través del empleo del modelo HDM-4 (Highway Development And Management), detallado en el capítulo 2.4 dedicado al agrietamiento de carreteras.

De acuerdo con la investigación llevada a cabo por Nalbandian Geymona en 2021, se ha observado que las primeras grietas tienden a hacerse evidentes aproximadamente un año después del inicio del uso de la carretera.

Según la investigación de Gschösser, F., et al., en 2013, las estrategias de mantenimiento para alcanzar una vida útil mínima de una carretera se deben ejecutar cada 7.5 años. Esto implica realizar una sustitución de la capa de

rodadura (capa de asfalto) a los 7.5 años, una sustitución de la capa de rodadura y la capa base a los 15 años, y así sucesivamente, culminando con una sustitución total a los 45 años. Se destaca que, según el estudio, la vida útil de una carretera de asfalto en Suiza es de 75 años.

Por otro lado, el estudio de Nalbandian Geymona en 2021 sugiere una frecuencia de mantenimiento de 1 a 2 veces al año para el sellado de grietas. Sin embargo, en el contexto específico de este trabajo, se ha definido una frecuencia de mantenimiento con una periodicidad de cada 5 años. Por consiguiente, para una unidad funcional de 1 kilómetro lineal de carretera en un periodo de 30 años, se requerirá llevar a cabo un mínimo de seis procedimientos de mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida.

La información de las cantidades de áridos, asfalto y consumo de combustible para el mantenimiento de sellado con lechada asfáltica fueron obtenidas a través de dos tesis (HENRÍQUEZ OSSES, 2019; NALBANDIAN GEYMONA, 2021) y llevadas a la unidad funcional (1 kilómetro de longitud). Sin embargo, como no se encontró información acerca de las emisiones al aire generadas por el uso de maquinaria, se calcularon mediante la guía metodológica de inventario de emisiones atmosféricas de igual manera como se calcularon las emisiones para la producción de áridos. Para esto, se asumió que la máquina para aplicar

el sellado pertenece a la categoría de camión liviano de diésel EURO 3 y se asumió una velocidad de 0,25 km/hr.

En el caso del escenario de la carretera de pavimento asfáltico con rejuvenecedor (escenario 2), el inventario se realizó de la misma manera que el escenario 1 (carretera de pavimento asfáltico convencional (sin rejuvenecedor)), con la diferencia de que, para la etapa de extracción de materias primas, se le añadió la cantidad de rejuvenecedor necesario a añadir para la unidad funcional. Mientras que, para la etapa del transporte, se calculó la distancia desde la ciudad de Antofagasta (lugar donde se ubican las plantas de producción de pirólisis) hasta la carretera del caso de estudio por dos (ida y vuelta). Luego para la etapa de construcción de la carretera, se adiciona el rejuvenecedor de asfalto proveniente de un líquido pirolítico encapsulado.

Sus efectos se visualizarán en la etapa de operación, específicamente con el fin de evitar la etapa de mantenimiento vial. Finalmente, para la etapa de operación (mantenimiento) es exactamente la misma que la etapa de operación del escenario 1, con la diferencia que en este escenario se evitarían dos mantenimientos de sellado con lechada asfáltica, a diferencia del escenario 1 que no se van a evitar ningún mantenimiento. A continuación, se presenta la tabla 4 ilustrando la cantidad de mantenimientos que se realizarán en cada escenario.

Tabla 4. Técnicas de mantenimiento de carreteras para cada escenario.

<i>Año</i>	<i>Pavimento asfáltico convencional</i>	<i>Pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor</i>
1 - 3	Construcción carretera	Construcción carretera
5	Sellado con lechada asfáltica	-
10	Sellado con lechada asfáltica	-
15	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
20	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
25	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
30	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que, en el contexto del presente caso de estudio, se han realizado ensayos de laboratorio orientados al rejuvenecedor de líquido pirolítico. Estos ensayos han revelado que la efectividad de dicho rejuvenecedor persiste hasta los primeros diez años de funcionamiento. Este hallazgo implica que, hasta la fecha de los ensayos, el rejuvenecedor ha demostrado ser eficaz en prevenir la aparición de grietas en el pavimento durante este periodo de tiempo. Debido a que el proceso se encuentra en fase de patentamiento no se puede proveer mayores antecedentes.

Adicionalmente, se han llevado a cabo ensayos de laboratorio con el rejuvenecedor de líquido pirolítico, evidenciando su eficacia hasta los primeros diez años. No obstante, persiste la incertidumbre acerca de si, transcurrido este periodo, todas las cápsulas han experimentado ruptura, o si aún subsiste un grado de eficacia. Esta distinción es de particular relevancia, ya que incide directamente en la determinación del número de intervenciones de mantenimiento que deberán aplicarse a la carretera.

A continuación, se presenta una tabla resumen del inventario de las fases del ciclo de vida:

Tabla 5. Inventario de fases del ciclo de vida

PROCESO		Fuente de información
Extracción de materia prima (ton)	Áridos	DIA ¹
	Asfalto (áridos y betún)	DIA; Ecoinvent; Stripple, H., 2001.
	Combustible	Butt. et al 2014; Ecoinvent
	Rejuvenecedor	Proyecto FONDEF ID2110127; Larrere. S. (2023).
Transporte de materias primas (tkm)		Ecoinvent
Construcción del pavimento flexible (con/sin rejuvenecedor) (UF=1 km)	Materia prima (con/sin rejuvenecedor)	Butt. et al 2014; DIA ¹ ; EIA ² ; Ecoinvent; Stripple, H., 2001; Proyecto FONDEF ID2110127

	Combustible	Butt. et al 2014; Ecoinvent; Stripple, H., 2001.
Operación (mantenimiento vial) (1 sellado con lechada asfáltica/1 km)	Áridos y asfalto	HENRÍQUEZ OSSES, 2019; NALBANDIAN GEYMONA, 2021.
	Combustible	NALBANDIAN GEYMONA, 2021.
Fin de vida útil	No se va a considerar	

¹ Sacyr Chile S.A. (2011). Declaración de Impacto Ambiental: «DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL “EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ÁRIDOS, CANTERA EL LITRE, PARA LA MATERIALIZACIÓN DE LA RUTA CONCESIONADA, AUTOPISTA CONCEPCIÓN-CABRERO”»

² Sociedad Concesionaria Valles del Biobío S.A. (2010). Estudio de impacto ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

5.7 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

La evaluación de los potenciales impactos ambientales del ciclo de vida, asociados a la etapa de ICV, serán evaluados mediante el método ReCiPe que se encuentra incluido en el software SimaPro V8.1. Además, ReCiPe es un método utilizado en la mayoría de los proyectos de ACV de carreteras (Elorrieta Mendoza (2023)).

En el contexto del método de evaluación de impacto, ReCiPe presentan dos enfoques, midpoint y endpoint. Principalmente, se encuentran los “midpoint,” que representan impactos ambientales cuantificados mediante 18 categorías de

impacto los cuales se encuentran representados gráficamente en la tabla 6. Mientras que los “endpoint,” están asociados a daños ambientales, siendo un total de 3 categorías de daños: Daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos. (Huijbregts et al., 2016).

Tabla 6. Resumen de las categorías de impacto que abarca la metodología ReCiPe 2016.

Unidad de medida	Mindpoint Categoría de impacto	Categoría de daño
DALY	Partículas en suspensión	Daño a la salud humana
DALY	Formación de ozono trop. (hum)	Daño a la salud humana
DALY	Radiación ionizante	Daño a la salud humana
DALY	Agotamiento de la capa de ozono	Daño a la salud humana
DALY	Toxicidad humana (cáncer)	Daño a la salud humana
DALY	Toxicidad humana (no cáncer)	Daño a la salud humana
DALY/ species.yr	Calentamiento global	Daño a la salud humana; Daño al ecosistema
species.yr	Uso del agua	Daño a la salud humana; Daño al ecosistema
species.yr	Ecotoxicidad en agua dulce	Daño al ecosistema
species.yr	Eutrofización del agua dulce	Daño al ecosistema
DALY	Formación de ozono tropo (eco)	Daño al ecosistema
species.yr	Ecotoxicidad terrestre	Daño al ecosistema
species.yr	Acidificación terrestre	Daño al ecosistema

<i>species.yr</i>	Uso del suelo/ transformación	Daño al ecosistema
<i>species.yr</i>	Ecotoxicidad marina	Daño al ecosistema
<i>species.yr</i>	Eutrofización marina	Daño a la disponibilidad de recursos
<i>USD2013</i>	Recursos minerales	Daño a la disponibilidad de recursos
<i>USD2013</i>	Recursos fósiles	

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Huijbregts et al. (2016).

5.8 COMPARATIVA AMBIENTAL DE LA FACTIBILIDAD DEL REJUVENECEDOR DE ASFALTO CON RESPECTO AL ASFALTO CONVENCIONAL

Considerando los dos sistemas previamente mencionados (sistema con rejuvenecedor y sistema sin rejuvenecedor), se procederá a seleccionar aquel que presente un menor impacto ambiental, basándose en la misma unidad funcional. Para realizar esta comparativa ambiental, se utilizará el método Endpoint de ReCiPe, ya que se considera más representativo al visualizarse como un único indicador en ecopoint (puntos). De esta manera, cuanto menor sea el punto, menor será el impacto ambiental, y, además, este método

proporciona una mejor representación de la categoría de impacto a la cual contribuye cada sistema.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO AMBIENTAL DE UNA CARRETERA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO CON Y SIN REJUVENECEDOR

Esta sección muestra los resultados del análisis comparativo ambiental correspondientes al ciclo de vida de un pavimento asfáltico sin la incorporación de un rejuvenecedor (convencional) y un pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor. Es importante recordar que este análisis abarcó desde la etapa de extracción de materias primas hasta la fase de operación, siendo esta última la etapa que incluye el mantenimiento vial. La unidad funcional considerada fue de 1 kilómetro de longitud de carretera, con una vida útil estimada de 30 años.

La representación del análisis ambiental comparativo a través de la evaluación de daño se encuentra plasmada en kilo puntos (Endpoint), tal como se evidencia en la figura 11. En dicha representación, se constata que el escenario del análisis de ciclo de vida de pavimentos asfálticos con rejuvenecedor exhibe una

disminución en los impactos totales en comparación con el escenario de pavimento asfáltico sin rejuvenecedor. Los impactos totales correspondientes son de 4,64 kPt para el uso de rejuvenecedores y 6,67 kPt para el tradicional, lo que representa una disminución del 30,4% de los impactos totales, demostrando la factibilidad ambiental del pavimento asfáltico con rejuvenecedor.

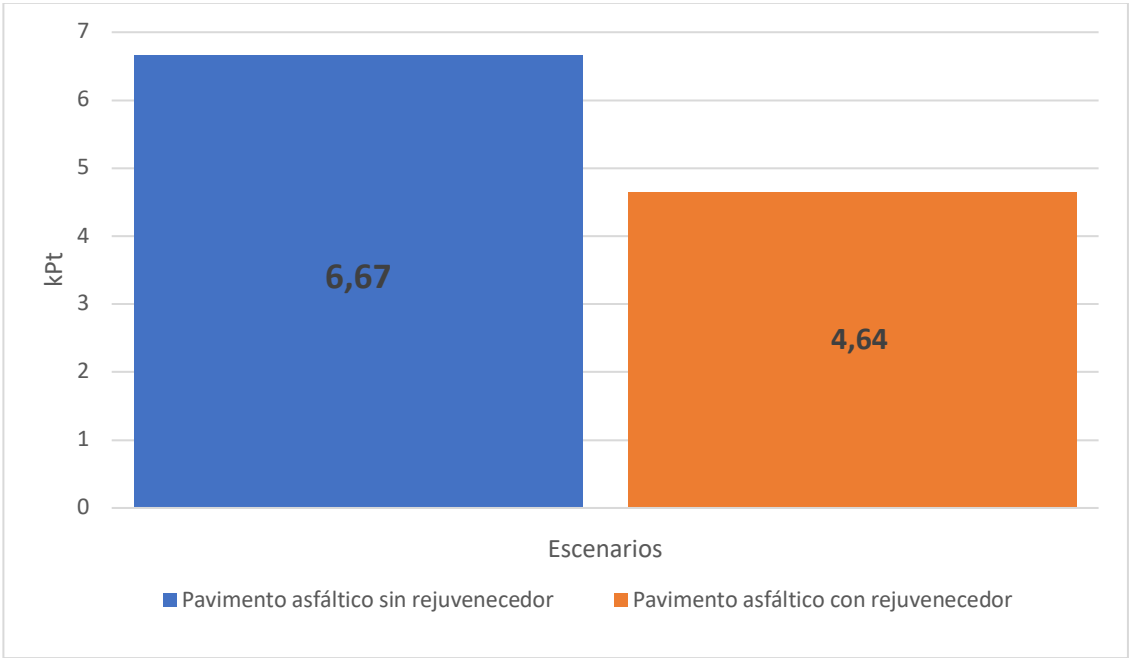


Figura 11. Comparativa entre los impactos totales de un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

La disminución en los niveles de impacto para el pavimento incorporando el aditivo encapsulado puede atribuirse a los siguientes fenómenos: i) la función rejuvenecedora de líquido pirolítico, contribuyendo a la restauración de los componentes malténicos (fracción líquida) del cemento asfáltico oxidado, y ii) la función autorreparante del líquido pirolítico, permitiendo una reducción en la viscosidad del ligante oxidado facilitando fluir a través de las microgrietas, sellándolas. En consecuencia, la ocurrencia de estos fenómenos de forma continua durante la vida útil de las cápsulas, estimada en 10 años, evitaría realizar en la etapa de operación (mantenimiento vial) 2 mantenimientos de sellado con lechada asfáltica dentro de la vida útil de 30 años como se ilustra en la tabla 7, reflejando un 30,4% de reducción de los impactos ilustrados en la figura 11. En caso de que el rejuvenecedor de líquido pirolítico sea efectivo por más años, este podría tener mayores beneficios ambientales debido a: i) la acción prolongada del rejuvenecedor, asumiendo como hipótesis que las cápsulas no serán activadas simultáneamente, sino más bien, en función de la demanda de tráfico, durante la vida en servicio de la carretera; y ii) que su activación progresiva postergará el proceso de mantenimiento de sellado con lechada asfáltica. Actualmente, no existe evidencia que cuantifique la extensión de la vida de servicio de una carretera por la acción de agentes rejuvenecedores encapsulados, por lo que se recomienda realizar futuros estudios en esta línea, para precisar cuántos mantenimientos se pudieran evitar.

Tabla 7. Técnicas de mantenimiento de carreteras para cada escenario.

<i>Año</i>	<i>Pavimento asfáltico convencional</i>	<i>Pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor</i>
1 - 3	Construcción carretera	Construcción carretera
5	Sellado con lechada asfáltica	-
10	Sellado con lechada asfáltica	-
15	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
20	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
25	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica
30	Sellado con lechada asfáltica	Sellado con lechada asfáltica

Fuente: Elaboración propia.

Al evitar los 2 mantenimientos de sellado con lechada asfáltica, se evitarían la extracción de 0,76 toneladas de áridos, 53,60 toneladas de betún y la utilización de 0,014 ton de diésel para el uso de maquinaria para el sellado.

Analizando el perfil ambiental del pavimento asfáltico con rejuvenecedor y segregado por etapas del ciclo de vida (ver Figura 12), se evidencia impactos positivos e impactos negativos. En donde los impactos con signo positivos representan los impactos generados en las categorías de impacto por las etapas del ciclo de vida de ambos escenarios, mientras que los impactos son

signo negativo ilustran el impacto del mantenimiento vial evitado producto de la aplicación del rejuvenecedor.

Es importante señalar que la contribución de los residuos municipales de la etapa de construcción y la disposición final de estos residuos inertes se excluyó para la gráfica dentro de la figura 12 debido a su muy baja contribución.

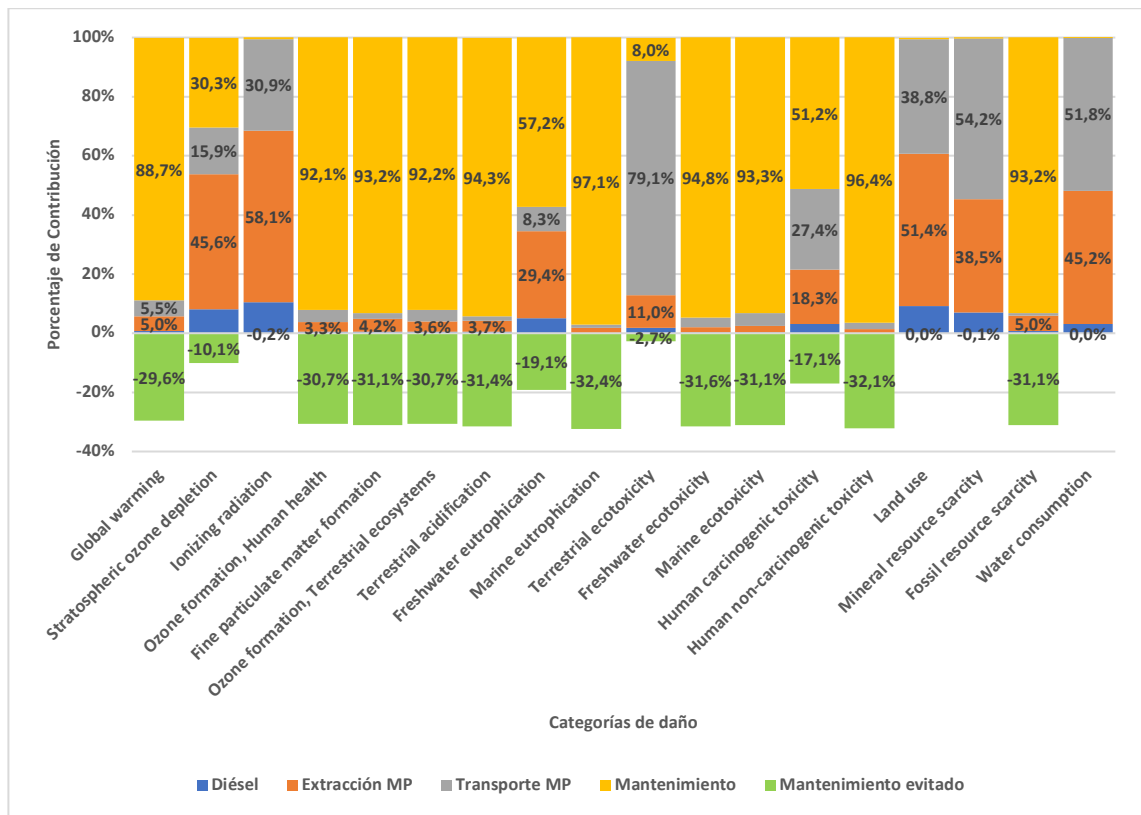


Figura 12. Perfil ambiental de la contribución de cada etapa del ciclo de vida de un pavimento asfáltico con la adición de un rejuvenecedor de asfalto.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

En el perfil ambiental se observa que, en 12 de las 18 categorías de impacto, la etapa de operación (mantenimiento vial) exhibe una contribución significativa, con porcentajes que oscilan entre el 51,6% y el 97,3%. Esto representa aproximadamente un 60% en promedio dentro de la carga ambiental total. Simultáneamente, la etapa de transporte de materia prima aporta en promedio alrededor del 20% debido al diésel por camión de carga entre 16-32 toneladas utilizado para transporte de materiales clasificado como EURO 4, mientras que la etapa de extracción de materia prima contribuye aproximadamente con un 17% debido al consumo del diésel por la maquinaria. El consumo de diésel representa solo un 3% de contribución en promedio. Y finalmente el mantenimiento evitado representado en color verde con un 20,1% en promedio. Ahora bien, al realizar un análisis comparativo más en detalle de las categorías de impacto, se consideró la significancia de una categoría por sobre otra. Para determinar cuál categoría es más significativa, se puede realizar mediante ponderación o normalización, donde la normalización lleva todas las categorías a un estado de referencia, mientras que la ponderación ve la importancia que cada categoría tiene entre una y otra. Por lo que, el análisis se realizó mediante una ponderación por cada categoría de impacto que está representada en la figura 13. Se observa que el pavimento asfáltico con rejuvenecedor presenta un menor impacto en las categorías de impacto relevantes para ambos escenarios. Estas categorías son: Fine particulate matter formation (formación de partículas

finas), Global warming Human Health (global warming Human Health), Human non-carcinogenic toxicity (toxicidad no cancerígena en humanos) y Fossil resource scarcity (escasez de recursos fósiles) sucesivamente.

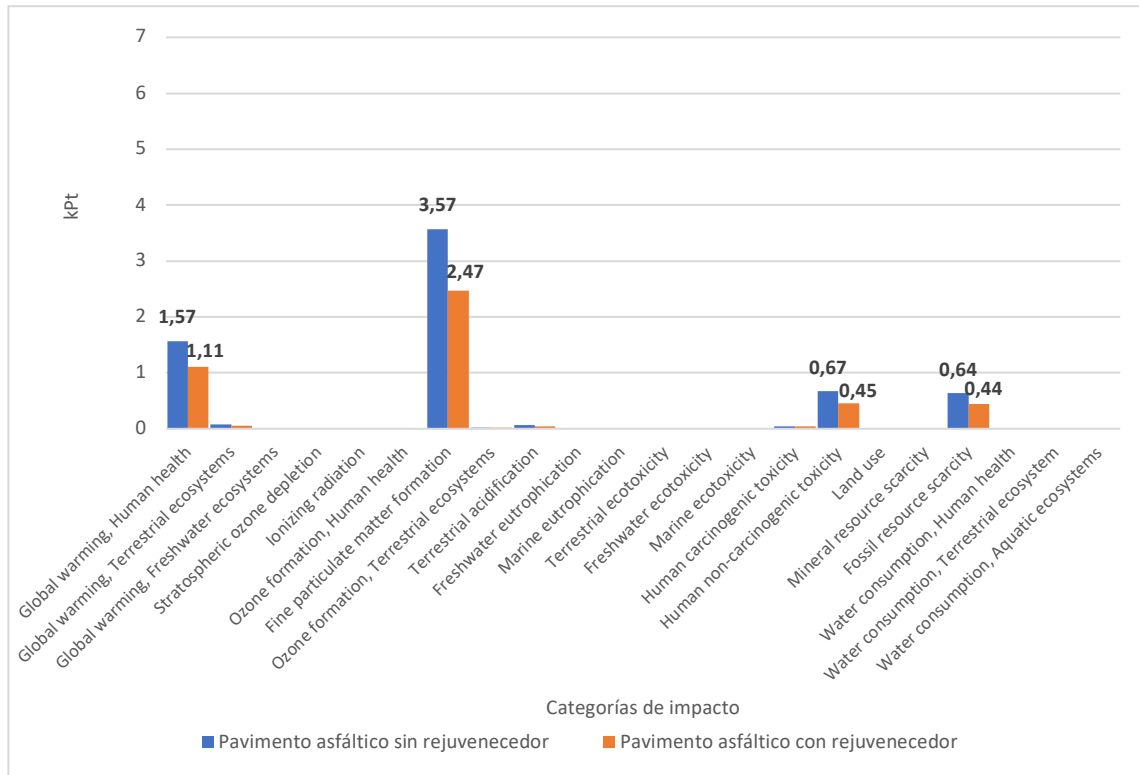


Figura 13. Comparativa de las ponderaciones de las categorías de impacto para un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

La categoría de daño "Formación de partículas finas" experimentó una reducción, disminuyendo de 3,57 kPt a 2,47 kPt, lo que representa una

disminución del 30,8%. En paralelo, la categoría "Impacto en la Salud Humana debido al Calentamiento Global" experimentó una disminución de 1,57 kPt a 1,11 kPt, lo que se traduce en una reducción del 30%. Por su parte, la categoría "Toxicidad no cancerígena para los seres humanos" registró una disminución de 0,67 kPt a 0,45 kPt, equivalente a un descenso del 32%. Finalmente, la categoría "Escasez de Recursos Fósiles" presentó una disminución de 0,64 kPt a 0,44 kPt, representando así una reducción del 31,25%.

Adicionalmente, este resultado se puede ilustrar de dos maneras, la primera es mediante una comparativa ambiental de las ponderaciones de ambos escenarios representados en la figura 13 mientras que la segunda es a través de una comparativa de las contribuciones de cada categoría de impacto dentro de la puntuación total de daño para ambos escenarios representado en la figura 14 (anexo).

Dentro de la categoría de Fine particulate matter formation se destaca el proceso de mayor contribución al betún. Las sustancias emitidas al aire que más contribuyen en el proceso del betún son, en orden sucesivo, el monóxido de azufre, dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. En lo que respecta al Global warming Human Health se identifican como mayores contribuyentes a los procesos del crudo de petróleo, la electricidad para la planta de betún, el gas natural quemado en la caldera industrial, el fuel oil residual quemado en la

caldera industrial y el transporte del fuel oil residual, en secuencia. La sustancia con la mayor contribución corresponde a las emisiones al aire de dióxido de carbono (CO₂). Para Human non-carcinogenic toxicity se encuentra que el proceso de producción de crudo de petróleo es el principal contribuyente, y la sustancia que más incide es la emisión al agua de Barium (Bario). Finalmente, en relación con Fossil resource scarcity se determina que el proceso de mayor contribución es la producción de crudo de petróleo, y la sustancia relevante es el crudo de petróleo (raw de oil, crude) asociados a la producción del betún.

No obstante, al realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida completo dentro de las categorías de daño, se observa que la etapa de operación del pavimento asfáltico sin la incorporación del rejuvenecedor exhibe una puntuación total de daño de 6,17 kPt y la etapa de construcción una puntuación de 0,505 kPt. En contraste, el pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor registra una puntuación de daño de 4,11 kPt para la etapa de operación y un 0,533 kPt para la etapa de construcción, lo que representa una disminución del 33,4% para la etapa de operación y un aumento del 5,25% para la etapa de construcción.

Esta reducción se atribuye al hecho de que, en el ciclo de vida del pavimento asfáltico convencional, se requieren seis mantenimientos de sellado con lechada asfáltica, mientras que, en el caso del pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor, se evitan dos de estos mantenimientos de sellado con

lechada. En consecuencia, solo se aplican cuatro mantenimientos con sellado de lechada, lo que se traduce en una disminución de emisiones durante la etapa de operación (mantenimiento vial).

En contraste con la etapa de construcción, que el aumento se atribuye a la inclusión del rejuvenecedor, considerando tanto su proceso de producción como el transporte hacia el área de estudio. Dentro de estos valores, se observa que la etapa de extracción de materias primas para la construcción de pavimento asfáltico con rejuvenecedor es un 10,8% superior en comparación con el pavimento asfáltico sin rejuvenecedor. El análisis del párrafo anterior se encuentra ilustrados en las figuras 15.

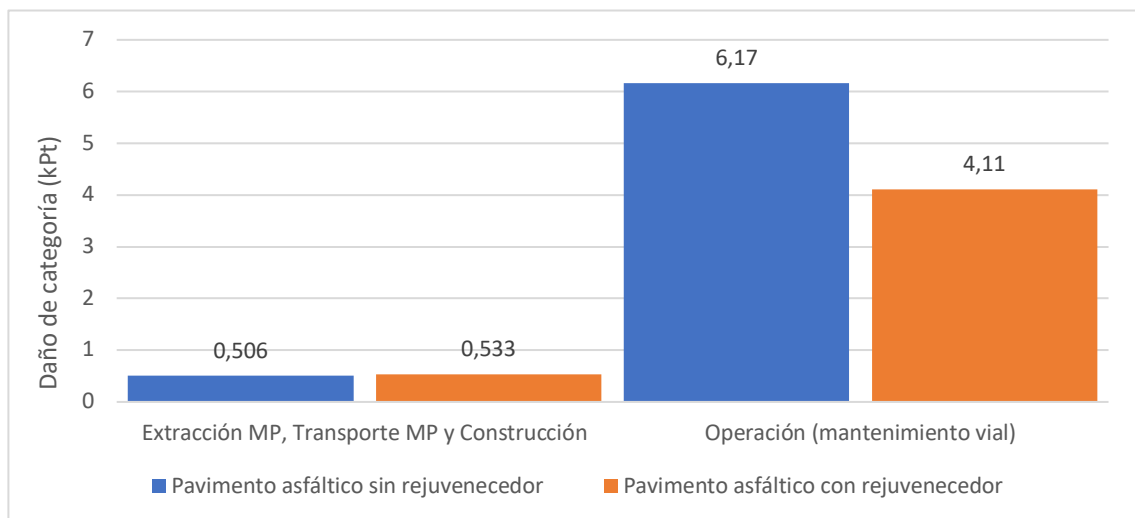


Figura 15. Comparación entre las etapas del ciclo de vida.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

Se detalla que, la etapa de operación (mantenimiento vial) ejerce una alta contribución sustancial dentro de las categorías de daño. Para la categoría de daño en la salud humana, el proceso de producción de betún se destaca como el principal contribuyente, seguido por sustancias de mayor relevancia, a saber, monóxido de azufre, dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de azufre (SO₂), respectivamente. En cuanto a la categoría de daño a los recursos, se identifica que la producción de crudo de petróleo es el proceso destacable, acompañado por la sustancia correspondiente al petróleo crudo. Por último, para la categoría de daño al ecosistema, el refinado del betún se erige como el principal contribuyente, seguido por el transporte de fuel oil residual, la electricidad para la planta y la producción de crudo de petróleo. Las sustancias relevantes en este contexto son las emisiones al aire de CO₂, monóxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Toda esta descripción se encuentra ilustrada en la siguiente figura 16.

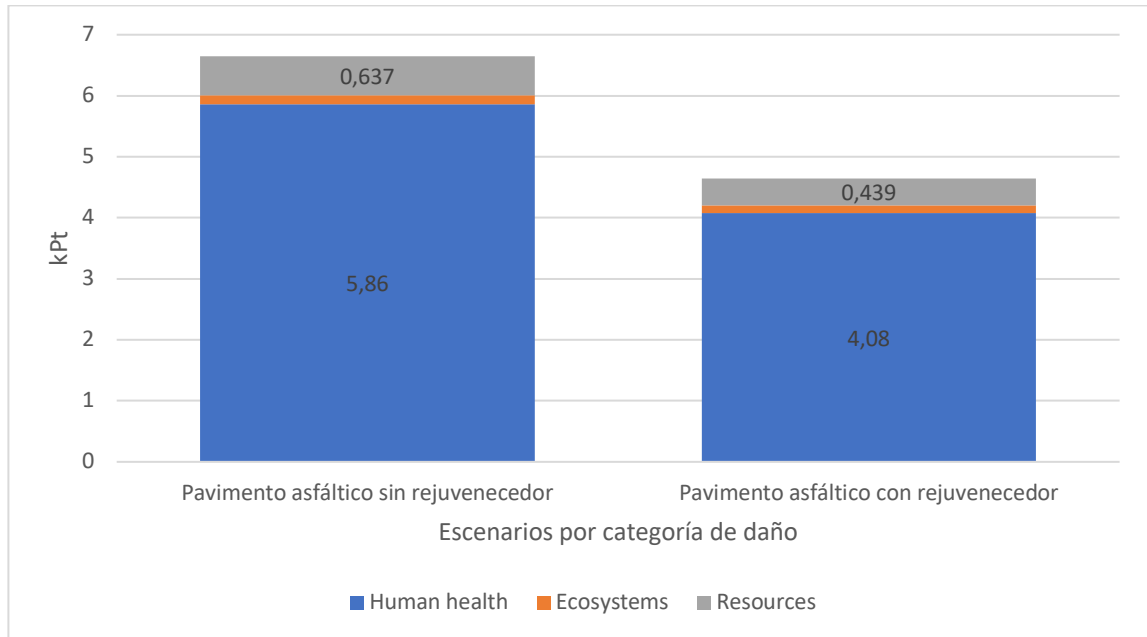


Figura 16. Comparación de etapas del ciclo de vida dentro de las categorías de daño.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

Dado que los estudios de análisis ambiental sobre la factibilidad de rejuvenecedores de asfalto, o análisis comparativos ambientales de los mismos, son escasos debido a la novedad de estas tecnologías, se encuentra una limitados los estudios de investigación que permitan realizar comparaciones de resultados en el contexto del análisis del ciclo de vida.

No obstante, se ha identificado un estudio comparativo ambiental titulado "Consecuencias de decisiones de infraestructura a largo plazo: el caso de las

carreteras autorreparables y sus emisiones de CO₂". A pesar de que dicho estudio examina el análisis del ciclo de vida desde la perspectiva de las emisiones de CO₂, se evidencia la falta de una evaluación de un perfil ambiental completo.

El estudio híbrido llevado a cabo por A. M. Rodríguez-Alloza et al. en 2019 se enfocó en las emisiones de CO₂ de una carretera autorreparable mediante la adición de escoria de acero reemplazando el árido que lleva la mezcla asfáltica, aplicando un proceso de calentamiento por radiación de microondas, con una unidad funcional de 1 kilómetro de carril y 3,5 metros de ancho. La vida útil considerada fue de 30 años para una carretera convencional y 42 años para una carretera autorreparable, esta última incorporando escoria de acero como árido en la mezcla asfáltica densa, con una composición de 6,20% de betún y 93,80% de agregados.

Los resultados del estudio por A. M. Rodríguez-Alloza et al. en 2019 indicaron que las carreteras con capacidad de auto-reparación presentan casi un 16% menos de emisiones de CO₂ a lo largo de su ciclo de vida (45 años) en comparación con una carretera convencional. Ahora, si adaptamos a la vida útil del estudio de A. M. Rodríguez-Alloza et al. en 2019 a la vida útil del trabajo de este presente informe (30 años), la disminución sería de un 10,6%. Además, durante su fase de construcción del estudio de A. M. Rodríguez-Alloza et al. en

2019, las carreteras autorreparables generan un impacto ambiental ligeramente superior, aproximadamente un 10% más, en comparación con las carreteras convencionales. Los principales contribuyentes a estas emisiones son el betún y las máquinas de construcción, tanto en la fase de construcción como en la de mantenimiento.

No obstante, para el caso de estudio de la presente investigación, se observa que la construcción de un pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor conlleva un impacto ligeramente superior, incrementándose en un 5,25% las categorías de daño de la comparación considerando solamente la construcción de ambos escenarios. Además, al evaluar las categorías de daño en el ciclo de vida de un pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor, se evidencia un impacto promedio de un 30% menor en comparación con el ciclo de vida de un pavimento asfáltico convencional, donde las mayores ventajas ambientales se logran en la etapa de operación (mantenimiento vial) por la reducción de realización de mantenimiento.

A pesar de que el estudio de A. M. Rodríguez-Alloza et al. 2019 informa una reducción del 16% en las emisiones de CO₂, es importante destacar que, en la presente investigación, la disminución abarca la totalidad del perfil ambiental a lo largo del ciclo de vida, no limitándose únicamente a las emisiones de CO₂.

Sin embargo, se hace complejo comparar la investigación con otros de estudios de ciclo de vida, ya que existe una serie de consideraciones en la metodología, como por ejemplo las diferentes unidades funcionales, las etapas dentro de los límites del sistema que se consideran, la exactitud de los datos y las consideraciones técnicas (como la efectividad del rejuvenecedor, los años de vida útil, etc.) que hacen que el perfil ambiental cambie. Aun así, con la escasez de información se logra corroborar coherencia con los estudios existentes en la literatura.

En última instancia, el presente estudio contribuye al fomento tanto de la Ley N°20.920, conocida como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), como a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Respecto a la Ley REP, el desarrollo del rejuvenecedor del líquido pirolítico proveniente de neumáticos mineros fuera de uso contribuye a la reducción de los residuos generados por los vehículos mineros, dado que los neumáticos constituyen uno de los residuos prioritarios contemplados en dicha legislación. Por otro lado, en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, este estudio aporta al ODS N°9, "Industria, innovación e infraestructura", específicamente al objetivo 9.4, el cual busca modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, haciendo un uso más eficiente de los recursos y promoviendo tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales. En este sentido, el caso de estudio aborda la modernización de la infraestructura

vial para reducir la utilización de recursos en la construcción y mantenimiento de carreteras.

7 CONCLUSIONES

La reducción de los impactos ambientales generados por las carreteras de pavimentos asfálticos, tanto en su fase operativa, considerando los mantenimientos, como en la construcción, extracción y transporte de los materiales, demanda el desarrollo de nuevas estrategias para mitigar los efectos negativos asociados. A pesar de que existen estudios comparativos con pavimentos reciclados (RAP), la literatura presenta limitadas investigaciones sobre la comparación entre pavimentos de asfalto convencional y pavimentos de asfalto autorreparable con rejuvenecedores de asfalto. La falta de estudios analíticos de ciclo de vida en relación con la viabilidad de los rejuvenecedores se atribuye a su reciente desarrollo.

La tecnología del rejuvenecedor de asfalto de líquido pirolítico, con su capacidad para la autorreparación del asfalto al entrar en contacto con las grietas, posibilita el aplazamiento del mantenimiento de la capa asfáltica, evitando así la fabricación de material virgen necesario para el mantenimiento vial, así como la generación de residuos, emisiones al aire y otros impactos ambientales. Se anticipa que el uso del líquido pirolítico contribuirá a la

reducción de los impactos asociados con la construcción y mantenimiento de carreteras de pavimento asfáltico.

Al realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) de una carretera local en un escenario hipotético para evaluar la viabilidad del rejuvenecedor aplicado, se derivan las siguientes conclusiones de los resultados de la investigación:

- En la comparación de los impactos ambientales dentro de las categorías de daño de cada escenario (pavimento asfáltico convencional y pavimentos asfálticos con la adición del rejuvenecedor), se observa que el pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor presenta un potencial significativo de ahorro de impacto, con un impacto promedio aproximadamente un 30% menor en el perfil ambiental en comparación con un pavimento asfáltico convencional.
- Al considerar las etapas del ciclo de vida de cada escenario desde la extracción de materias primas hasta la construcción de la carretera, se concluye que el pavimento asfáltico con la adición del rejuvenecedor tiene un impacto total aproximadamente un 5,25% mayor que una carretera de pavimento asfáltico convencional.
- Dentro de las etapas del ciclo de vida, la etapa de operación emerge como la principal contribuidora al perfil ambiental, debido a la producción

de betún para el mantenimiento de la carretera y al transporte de materias primas mediante el uso de combustibles en maquinaria.

No obstante, se destaca la sensibilidad de los resultados de este trabajo a las consideraciones metodológicas en el análisis de ciclo de vida, la calidad de la información obtenida y la estructura de los procesos evaluados.

8 REFERENCIAS

Abdalla, A. N., Tutumluer, E., & Walters, E. (2022). Life cycle assessment of ecofriendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132471>

Ahmed, R. B., & Hossain, K. (2020). Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 230, 116985. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116985>

Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., 2014. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 32, 97–110.. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>

Artemio, S. V. (2012, abril 17). Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/529>

Ayala, J. P., & Hansen, K. H. (2020). APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN A PROPUESTAS DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN CHILE. <https://aidisnet.org/wpcontent/uploads/2019/07/445-Chile-poster.pdf>

Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: a review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>

Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2009). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE FUENTES FIJAS Y MÓVILES EN EL REGISTRO DE EMISIONES Y TRANSFERENCIA DE CONTAMINANTES. Departamento de Control de la Contaminación de CONAMA.

De Cea Antonio, A. (2001, 18 julio). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93218>

Del Congreso Nacional, B. (s. f.). Biblioteca del Congreso Nacional. www.bcn.cl/leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=274262>

Díaz, R, Echaveguren, T, & Vargas-Tejeda, S. (2012). Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos. *Revista de la construcción*, 11(1), 101118. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100010>

Dirección de Vialidad con el apoyo de la Dirección de Planeamiento. (2010). Política de Conservación Vial Caminos Pavimentados. Dirección de Planeamiento Ministerio de Obras Públicas. <https://planeamiento.usercode.cl/planes-y-estudios/estudios-y-politicas/>

Elorrieta Mendoza, A. A. (2023). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN TRAMO DE LA CARRETERA TACNA – COLLPA EN LA REGIÓN DE TACNA [Tesis para obtener el título 86 echnology 86 I de Ingeniero Civil]. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

Esperanza Haya, L (2016). Análisis de Ciclo de Vida. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental.
https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf

Fabián, O. R. M., & Sánchez Relaño, L. (2018, septiembre). Análisis de ciclo de vida de las tecnologías eólica e hidráulica en España – Archivo Digital UPM.
<https://oa.upm.es/52844/>

Farré I Ventura, M. (2013). Análisis del Ciclo de Vida. Universidad Politécnica de Catalunya.
https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/Analisis%20del%20Ciclo%20de%20Vida.pdf

Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M., & Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. Journal of Hazardous Materials, 184(1-3), 603-611.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.078>

Garcia, U. F. C., Trujillo, H. C., & Restrepo-Tarquino, I. (2017). Gestión tecnológica, sostenibilidad y competitividad minera. Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida. Dynacolombia, 84(201), 50. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.60326>

Gschösser, F., Wallbaum, H., 2013. Life Cycle Assessment of Representative Swiss Road Pavements for National Roads with an Accompanying Life Cycle Cost Analysis. Environmental Science & Technology 130718092515005..
<https://doi.org/10.1021/es400309e>

Guduru, G., Kumara, C., Gottumukkala, B., Kuna, K.K., 2021. Effectiveness of Different Categories of Rejuvenators in Recycled Asphalt Mixtures. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements 147, 04021006.
<https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000255>

Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M. C., Hollander, A., & Van Zelm, R. (2016). Recipe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

ISO. (2006, 1 de julio). Norma Internacional ISO 14040. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/37456/0e3ee22afc7540488f66804b504580a4/ISO14040-2006.pdf>

Kumara, C., Guduru, G., Gottumukkala, B., Kuna, K., 2022. Study on Aging Resistance of Bitumen Rejuvenated with Various Rejuvenators for Hot Recycling, in: RILEM Bookseries. RILEM Bookseries, pp. 1697–1704. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_215

Larrere. S. (2023). Análisis de ciclo de vida del proceso de encapsulamiento de rejuvenecedores pirolíticos para el uso de mezclas asfálticas autorreparables. Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Químico.

National Center for Asphalt Technology. (2014). ASPHALT TECHNOLOGY NEWS (1.a ed., Vol. 26). <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/research/newsletters/atnspring2014.pdf>

Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Pérez, L. E., Concha, J. L., & Gonzalez-Torre, I. (2021). Pyrolytic oil from waste tyres as a promising encapsulated rejuvenator for the extrinsic self-healing of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S117-S133. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1907216>

Martínez, C. A. (2015). *Análisis del ciclo de vida de los pavimentos asfálticos*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/15195>.

Ministerio de Obras Públicas – Dirección de Vialidad. (2022). INFORMES Y ESTUDIOS: Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional.

Vialidad.mop.gob.

<https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/gestionvial/Paginas/Informesyestudios.aspx>

Ministerio de Obras Públicas & Dirección de Vialidad. (1997). Manual de Carreteras: Volumen N°1: Evaluación de Proyectos Viales Interurbanos (1997. a ed., Vol. 1). https://portal.ondac.com/601/articles-59870_doc_pdf.pdf

Ministerio de Obras Públicas (Ed.). (2020). Manual de Carreteras: Volumen N°3 «Instrucciones y Criterios de Diseño» (2018.a ed., Vol. 3). https://portal.ondac.com/601/articles-59868_doc_pdf.pdf

Ministerio de Obras Públicas & Dirección de Vialidad. (2020). Manual de Carreteras: Volumen N°7: Mantenimiento Vial (2020.a ed., Vol. 7). https://portal.ondac.com/601/articles59862_doc_pdf.pdf

Ministerio de Obras Públicas (Ed.). (2020). Manual de Carreteras: Procedimientos de Estudios Viales (2020.a ed., Vol. 2). https://portal.ondac.com/601/articles59867_doc_pdf.pdf

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Ed.). (2020). Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias, versión 2020: Cap. No12: Especificaciones Técnicas de Mantenimiento y Reconstrucción de Vías (Conservación). Subdirección de Pavimentación y Obras Viales | SERVIU Metropolitano. <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/>

Miranda Rebolledo, R. J. (2010). Deterioro en Pavimentos Flexibles y Rígidos [Tesis para optar al título de: Ingeniero Constructor]. Universidad Austral de Chile.

Pereira, M. C. R. (2022). Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8552387>

Rajib, A.I., Samieadel, A., Zalghout, A., Kaloush, K.E., Sharma, B.K., Fini, E.H., 2022. Do all rejuvenators improve asphalt performance?. Road Materials and Pavement Design 23, 358–376. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826348>

Roberto, R. C. (2014, 22 agosto). Análisis de ciclo de vida aplicado a Plantas termoeléctricas convencionales y de ciclo combinado. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4258>

Rodríguez-Alloza, A.M., Heihsel, M., Fry, J., Gallego, J., Geschke, A., Wood, R., Lenzen, M., 2019. Consequences of long-term infrastructure decisions—the case of self-healing roads and their CO2 emissions. *Environmental Research Letters* 14, 114040.. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab424a>

Rodríguez, J. A., Noriega, L., Orozco, I. H., & Ortega, A. (2019). Análisis de Ciclo de Vida para la producción de biodiesel derivado de palma de aceite caso colombiano. *Publicaciones e investigación*, 13(1), 11-24. <https://doi.org/10.22490/25394088.3262>

Rodríguez Moreno, M, Theboux Zeballos, G, & González Vaccarezza, A. (2013). Probabilistic Assessment of Cracking in Asphalt Pavements in Chilean Roads. *Revista de la construcción*, 12(2), 152-165. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200012>

Rodríguez, M., Juan Pablo, García, U., César, A., Zafra, M., & Carlos Alfonso. (2018). EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA APLICADO A LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Ciencia y Sociedad*, 41(3). <https://www.redalyc.org/pdf/870/87048049007.pdf>

Sacyr Chile S.A. (2011). Declaración de Impacto Ambiental: «DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL “EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ÁRIDOS, CANTERA EL LITRE, PARA LA MATERIALIZACIÓN DE LA RUTA CONCESIONADA, AUTOPISTA CONCEPCIÓN-CABRERO”»

Siverio Lima, M.S., Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Sitzenfrei, R., Buttgerit, A., Queiroz, C., Haritonovs, V., Gschösser, F., 2021. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. *Sustainability* 13, 12487.. <https://doi.org/10.3390/su132212487>

SOCIEDAD CONCESIONARIA COSTANERA NORTE S.A. (2010, 28 octubre). Declaración de Impacto Ambiental «Mejoramiento Conexiones Sistema Oriente – Poniente (Costanera Norte) – Sistema Norte – Sur (Autopista Central), Sector Vivaceta». Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=5032201>

Stripple, H., 2001. Evaluación del ciclo de vida de la carretera: un estudio piloto para el análisis de inventarios. Segunda edición revisada en marzo. Go teborg, Suecia: IVL Swedish Environmental Research Institute.

Súrfax, G. (2018, 2 noviembre). INFLUENCIA DE UN ADITIVO REJUVENECEDOR PARA MEZCLAS CON RAP SOBRE LA TEMPERATURA DE FALLA DEL ASFALTO DE APORTE. Vanguardia en la Investigación. <https://gruposurfax.wordpress.com/2018/11/01/influencia-de-unaditivo-rejuvenecedor-para-mezclas-con-rap-sobre-la-temperatura-de-falla-del-asfalto-deaporte/>

Thenoux, G., González, Á. P., & Dowling, R. (2007). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resource Conservation and Recycling*, 49(4), 325-339. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>

Valdebenito, C. (2011). “Caracterización del flujo vehicular de la red vial básica en la Región del Bío Bío”. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío Bío, Concepción.

Vallejo, L. A. M., Cortés-Mora, H. G., Méndez-Alcázar, J. A., & Peña-Reyes, J. I. (2022, 20 enero). Un enfoque desde la sustentabilidad: análisis de ciclo de vida como herramienta para la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Colombia. *Gestión y Ambiente*. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.86822>

Xu, S., Liu, X., Tabakovic, A., Lin, P., Zhang, Y., Nahar, S., Lommerts, B. J., & Schlangen, E. (2021). The role of rejuvenators in embedded damage healing for asphalt pavement. *Materials & Design*, 202, 109564. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109564>

Xue, B., Wang, H., Pei, J., Li, R., Zhang, J., & Fan, Z. (2017). Study on self-healing Microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*, 135, 641-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165>

Yan, S., Dong, Q., Chen, X., Zhou, C., Dong, S., & Gu, X. (2022). Application of waste oil in asphalt Rejuvenation and Modification: A Comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 340, 127784. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127784>

Zhang, R., You, Z., Wang, H., Chen, X., Si, C., & Peng, C. (2018). Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt. *Construction and Building Materials*, 189, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201>

Zheng, M., Chen, W., Ding, X., Zhang, W., Yu, S., 2021. Comprehensive Life Cycle Environmental Assessment of Preventive Maintenance Techniques for Asphalt Pavement. *Sustainability* 13, 4887.. <https://doi.org/10.3390/su13094887>

9 ANEXO

A continuación, se presentan gráficos y tablas que fueron utilizadas para describir los resultados de la investigación.

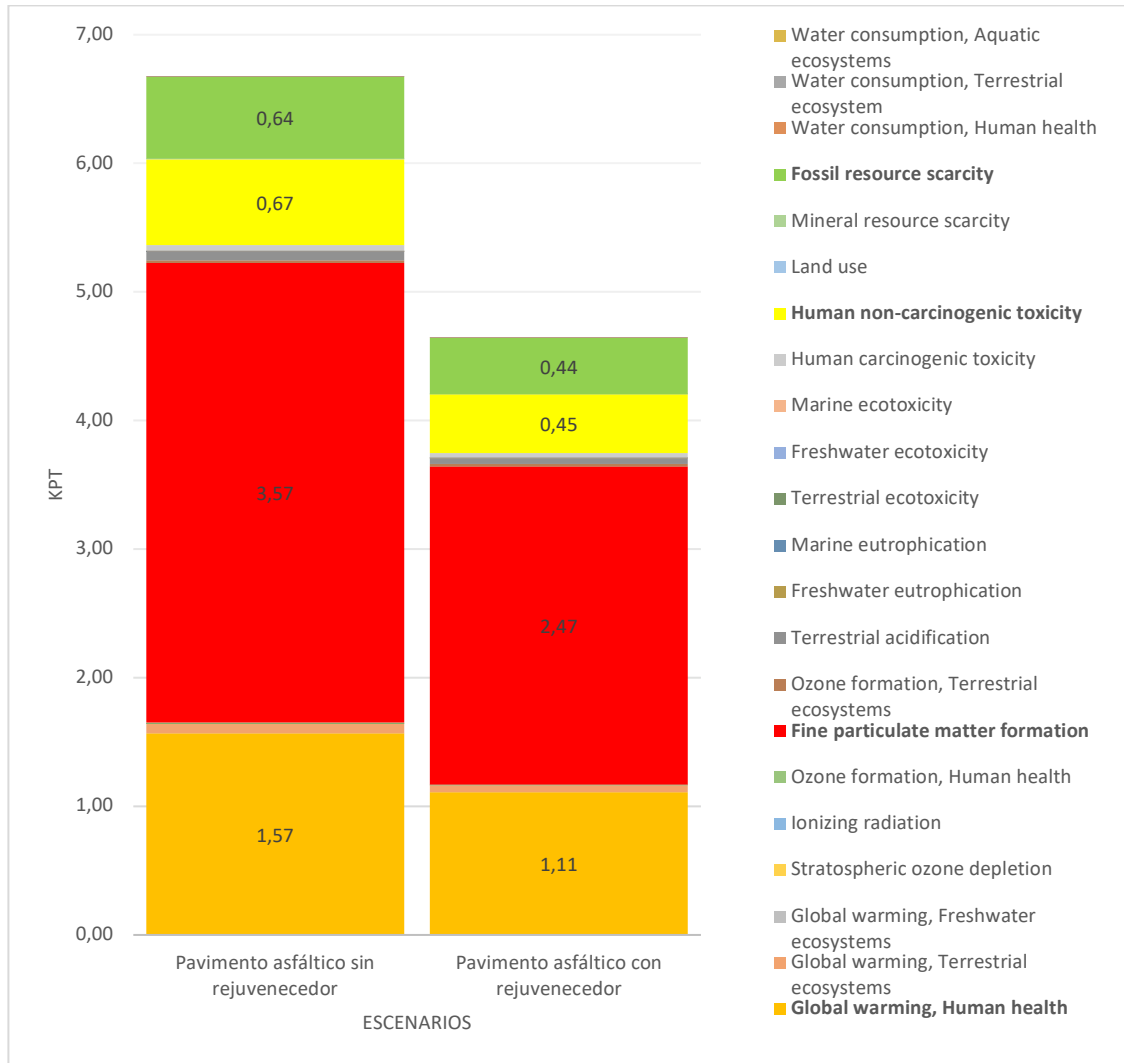


Figura 14. Comparativa de las contribuciones de cada categoría de impacto dentro de la puntuación total de daño para un pavimento asfáltico convencional y un pavimento asfáltico con la adicción del rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

Las tablas subsiguientes se emplearon con el propósito de generar los perfiles ambientales.

Tabla 8. Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico convencional.

Categoría de impacto	Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico sin rejuvenecedor (en %)			
	Diésel	Extracción MP	Transporte MP	Mantenimiento
Global warming, Human health	0,70%	4,58%	5,51%	89,10%
Global warming, Terrestrial ecosystems	0,70%	4,58%	5,51%	89,10%
Global warming, Freshwaer ecosystems	0,70%	4,58%	5,51%	89,10%
Stratospheric ozone depletion	0,70%	4,58%	5,51%	89,10%
Ionizing radiation	8,20%	45,50%	15,90%	30,40%
Ozone formation, Human health	10,50%	58,00%	30,90%	0,55%
Fine particulate matter formation	0,50%	3,19%	4,12%	92,20%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,61%	3,73%	2,01%	93,60%
Terrestrial acidification	0,49%	3,45%	3,91%	92,10%
Freshwater eutrophication	0,53%	3,62%	1,43%	94,40%
Marine eutrophication	5,17%	28,80%	8,32%	57,70%
Terrestrial ecotoxicity	0,18%	1,38%	1,14%	97,30%
Freshwater ecotoxicity	1,94%	10,70%	79,30%	7,98%

Marine ecotoxicity	0,21%	1,69%	3,20%	94,90%
Human carcinogenic toxicity	0,34%	2,05%	4,31%	93,30%
Human non-carcinogenic toxicity	3,15%	17,60%	27,70%	51,60%
Land use	0,17%	1,17%	2,16%	96,50%
Mineral resource scarcity	9,28%	51,30%	38,90%	0,48%
Fossil resource scarcity	6,95%	38,40%	54,20%	0,45%
Water consumption, Human health	0,84%	5,00%	0,94%	93,20%
Water consumption, Terrestrial ecosystem	3,70%	20,46%	75,57%	0,21%
Water consumption, Aquatic ecosystems	1,51%	8,37%	90,00%	0,12%

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.

Tabla 9. Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico con la adicción de un rejuvenecedor de asfalto.

Categoría de impacto	Perfil ambiental de la construcción de pavimento asfáltico con rejuvenecedor					
	Diés el	Extracc ión MP	Transp orte MP	Mantenimi ento	Mantenimi ento evitado	Mantenimi ento final
Global warming, Human health	0,7 %	5,0%	5,5%	88,7%	-29,6%	59,1%

Global warming, Terrestrial ecosystems	0,7 %	5,0%	5,5%	88,7%	-29,6%	59,1%
Global warming, Freshwater ecosystems	0,7 %	5,0%	5,5%	88,7%	-29,6%	59,1%
Stratospheric ozone depletion	8,2 %	45,6%	15,9%	30,3%	-10,1%	20,2%
Ionizing radiation	10,5 %	58,1%	30,9%	0,5%	-0,2%	0,4%
Ozone formation, Human health	0,5 %	3,3%	4,1%	92,1%	-30,7%	61,4%
Fine particulate matter formation	0,6 %	4,2%	2,0%	93,2%	-31,1%	62,1%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,5 %	3,6%	3,9%	92,2%	-30,7%	61,5%
Terrestrial acidification	0,5 %	3,7%	1,4%	94,3%	-31,4%	62,9%
Freshwater eutrophication	5,1 %	29,4%	8,3%	57,2%	-19,1%	38,1%
Marine eutrophication	0,2 %	1,6%	1,1%	97,1%	-32,4%	64,7%
Terrestrial ecotoxicity	1,9 %	11,0%	79,1%	8,0%	-2,7%	5,3%

Freshwater ecotoxicity	0,2 %	1,8%	3,2%	94,8%	-31,6%	63,2%
Marine ecotoxicity	0,2 %	2,2%	4,3%	93,3%	-31,1%	62,2%
Human carcinogenic toxicity	3,1 %	18,3%	27,4%	51,2%	-17,1%	34,1%
Human non-carcinogenic toxicity	0,2 %	1,3%	2,2%	96,4%	-32,1%	64,3%
Land use	9,3 %	51,4%	38,8%	0,5%	0,0%	0,4%
Mineral resource scarcity	6,9 %	38,5%	54,2%	0,4%	-0,1%	0,2%
Fossil resource scarcity	0,8 %	5,0%	0,9%	93,2%	-31,1%	62,1%
Water consumption, Human health	1,5 %	43,5%	55,5%	0,5%	0,0%	0,5%
Water consumption, Terrestrial ecosystem	1,8 %	44,4%	53,6%	0,1%	0,0%	0,1%
Water consumption, Aquatic ecosystems	5,8 %	47,6%	46,2%	0,3%	-0,1%	0,2%

Fuente: Elaboración propia con información extraída del SimaPro.