

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES”

TEMA:

EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE UNA
CARRETERA DESDE UNA PERSPECTIVA DE CICLO DE VIDA

AUTOR:

JUAN PABLO VALLE GÓMEZ

Guayaquil - Ecuador

2020

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y comparar los impactos ambientales que provocará durante 20 años una carretera de hormigón asfáltico versus una de hormigón hidráulico y determinar cuál de los sistemas tiene mejor desempeño ambiental. La evaluación se la realizará utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, teniendo como unidad funcional 1 km de los dos tipos de pavimento por 20 años. El análisis se realizó evaluando las categorías de impacto de Potenciales de Calentamiento Global, Agotamiento Abiótico y de Combustibles Fósiles, Agotamiento de Capa de Ozono, Acidificación, Eutrofización y de Oxidación Fotoquímica. Las etapas que serán evaluadas son las de Construcción, Uso, Rehabilitación de la capa de rodadura y Fin de vida útil. En la etapa de uso se considerarán las contribuciones al potencial de Calentamiento Global de la capa de rodadura a través de efecto albedo y de la carbonatación del hormigón hidráulico, el consumo de combustible y la influencia de su rugosidad (IRI). La etapa de mantenimiento comprenderán los trabajos para mantener su serviciabilidad, con trabajos que incluyen el levantamiento y trituración de la capa de rodadura para ser reciclado como agregado para conformar la nueva capa de rodadura. A pesar de la poca información y omisión de etapas y aspectos, muchos de los estudios realizados muestran que los pavimentos de hormigón asfálticos tienen menor desempeño ambiental que hechos con hormigón hidráulico. Este estudio determinó que, al igual de anteriores investigaciones que utilizan otras metodologías comparativas, que el pavimento de hormigón hidráulico tiene mejor desempeño ambiental que el de hormigón asfáltico.

Palabras claves: Análisis de Ciclo de Vida, Hormigón Hidráulico, Hormigón Asfáltico, Pavimento, Impactos Ambientales, Categorías de Impacto.

ABSTRACT

The aim of this work is to evaluate and compare the environmental impacts caused by asphalt concrete road versus a hydraulic concrete one will cause for 20 years and determine which of these systems has the best environmental performance. The evaluation will be carried out using the Life Cycle Analysis methodology, using a functional unit 1 km of the two types of pavement for 20 years. The analysis was performed evaluating the impact categories of Global Warming Potentials, Abiotic Depletion and Fossil Fuels, Ozone Layer Depletion, Acidification, Eutrophication and Photochemical Oxidation. The phases to be evaluated are Construction, Use, Rehabilitation and End of life. In the use phases, the contributions to the Global Warming potential of the rolling layer through the albedo effect and the carbonation of hydraulic concrete, the fuel consumption and the influence of its roughness (IRI) will be considered. The maintenance stage will include work to maintain its serviceability, work including milling and crushing the layer to be recycled as an aggregate to form the new layer. Despite the lack of information and omission of phases and aspects, many of the studies carried out show that asphalt concrete pavements have lower environmental performance than those made with hydraulic concrete. This study determined that, like previous researches using other comparative methodologies, hydraulic concrete pavement has better environmental performance than asphalt concrete.

Keywords: Life Cycle Analysis, Hydraulic Concrete, Asphalt Concrete, Pavement, Environmental Impacts, Impact Categories.

DEDICATORIA

A mis padres,
A todas las personas que
de alguna u otra manera
me ayudaron y estuvieron
conmigo a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTO

A mi Director de Proyecto,
A todas las personas que de
alguna manera contribuyeron
a la culminación de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.



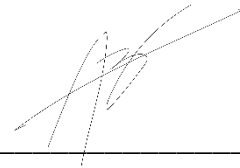
Juan Pablo Valle Gómez

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



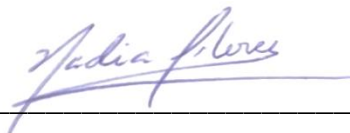
Carlos Rodríguez Díaz, Ph.D.

PRESIDENTE



Ángel Ramírez Mosquera, Ph.D.

DIRECTOR



M.Sc. Nadia Flores Manrique

VOCAL 1

ABREVIATURAS O SIGLAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
PCA	Portland Cement Association
EU ETS	EU Emissions Trading System
CML	Institute of Environmental Sciences
EICV	Evaluación De Impacto De Ciclo De Vida
ICV	Inventario De Ciclo De Vida
ECV	Estudios de Ciclo de Vida
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
IRI	Índice Rugosidad Internacional
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
FCC	Factor de Consumo de Combustible
PSI	Present Serviabiiliy Index

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Definición de pavimento.....	6
2.2. Análisis de ciclo de vida.....	7
2.2.1. Objetivo y Alcance.....	8
2.2.1.1 Unidad Funcional.....	9
2.2.1.2 Selección de las categorías de impacto ambiental.....	9
2.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida.....	10
2.2.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida.....	10
2.2.3.1 Categorías De Impacto De Ciclo De Vida.....	11
2.2.4 Interpretación del ciclo de vida.....	12
CAPÍTULO 3.....	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1 Definición de Unidad Funcional y de Límites del Sistema.....	14
3.1.1 Definición de unidad funcional.....	14
3.1.2 Descripción y Límites de los Sistemas.....	15
3.1.3 Obtención de los datos.....	15
3.2 Definición de las etapas a considerar en la Evaluación de Ciclo de Vida.....	16

3.2.1 Etapa de construcción.	16
3.2.2 Etapa de uso.	19
3.2.2.1 Uso de combustible.	19
3.2.2.2 Efecto Albedo.	20
3.2.2.3 Carbonatación.	21
3.2.3 Etapa de mantenimiento.	22
3.2.4 Etapa de fin de vida útil.	23
3.3 Análisis De Inventario Del Ciclo De Vida	24
3.3.1 Inventario para la etapa de construcción.	24
3.3.2 Inventario para la etapa de uso.	26
3.3.3 Inventario para la etapa de mantenimiento.	28
CAPÍTULO 4.....	30
4. RESULTADOS.....	30
4.1 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de construcción.	30
4.1.1 Pavimento de hormigón asfáltico.	30
4.1.2. Pavimento de hormigón hidráulico.	33
4.1.3 Comparación de resultados de construcción de la estructura de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.	36
4.2 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de mantenimiento.....	37
4.2.1 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de mantenimiento para una estructura de hormigón asfáltico.	37
4.3. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de uso. ..	41
4.3.1. Análisis y comparación de los resultados de caracterización del efecto albedo y de carbonatación.	41
4.3.2. Análisis y comparación de los resultados de caracterización de los efectos asociados al consumo de combustible.	42
4.4. Análisis y comparación de los resultados de caracterización durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.	43
4.4.1. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la categoría de Calentamiento Global durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.	43
4.4.2. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la categoría de Agotamiento Abiótico por Consumo de Combustible durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.	44
4.4.3. Análisis y comparación de los resultados de caracterización de los impactos durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.	47
CAPÍTULO 5	50

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
5.1.	Conclusiones	51
5.2.	Recomendaciones.....	54
6.	Referencias.....	55
7.	Apéndices y anexos	60

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 2. 1 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida	8
Fig. 3. 1 Sección transversal de un pavimento de hormigón asfáltico.	14
Fig. 3. 2 Sección transversal de un pavimento de hormigón hidráulico	15
Fig. 3. 3 Límites del sistema para el Análisis del Ciclo de Vida	15
Fig. 3. 4 Relación entre la edad del pavimento y la rugosidad	20
Fig. 3. 5 Relación entre la edad del pavimento y su Índice de Serviciabilidad Presente (Índice de Estado)	23
Fig. 4. 1 Análisis de contribución de los procesos y materiales para la etapa de construcción de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.	31
Fig. 4. 2 Análisis de contribución de los procesos y materiales a las categorías de impacto, para la etapa de construcción de 1 km de un pavimento de hormigón hidráulico para 20 años.	34
Fig. 4. 3 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la etapa de construcción de la estructuras de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.	37
Fig. 4. 4 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la etapa de construcción de la estructuras de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.	39
Fig. 4. 5 Relación proporcional entre resultados de los impactos ambientales de los procesos de construcción y mantenimiento (reapeo) de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.	39
Fig. 4. 6 Análisis de contribución de los procesos y materiales a las categorías de impacto, de la etapa de mantenimiento de 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.	40
Fig. 4. 7 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la construcción de 1 km de estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico con su mantenimiento (reapeo cada 6.6 años) por 20 años.	41
Fig. 4. 8 kg de CO₂ emitido por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.	44
Fig. 4. 9 Potencial de Calentamiento Global: Análisis de contribución de las actividades durante 20 años para 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico.	44
Fig. 4. 10 Agotamiento biótico por consumo de combustible, en MJ, por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.	46
Fig. 4. 11 Potencial de Agotamiento Abiótico por consumo de combustibles fósiles (MJ): Análisis de contribución de los procesos y etapas para 1 km de un pavimento de hormigón hidráulico por 20 años.	46
Fig. 4. 12 Potencial de Agotamiento Abiótico por consumo de combustibles fósiles (MJ): Análisis de contribución de los procesos y etapas para 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.	47
Fig. 4. 13 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la vida útil de 1 km de estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico por 20 años.	49

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3. 1 Datos de inventario para la construcción para 1 km de carretera de hormigón hidráulico para 20 años.....	17
Tabla 3. 2 Datos de inventario para la construcción de 1 km de carretera de hormigón asfáltico para 20 años.....	18
Tabla 3. 3 Fuentes de datos para la construcción de un 1 km de pavimento hidráulico y asfáltico para 20 años.....	24
Tabla 3. 4 Tráfico estimado que soportará la estructura de pavimento durante 20 años.....	27
Tabla 3. 5 Valores de albedo para diferentes tipos de superficie de pavimento.	28
Tabla 4. 1 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.....	30
Tabla 4. 2 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico para 20 años.	33
Tabla 4. 3 Comparación de resultados de la caracterización para la etapa de construcción de 1 km de una estructura de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.....	36
Tabla 4. 4 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción y mantenimiento de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.....	38
Tabla 4. 5 Comparación de resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico con su mantenimiento (reapeo cada 6.6 años) por 20 años.	40
Tabla 4. 6 Efecto Albedo de una estructura de 1 km de pavimento por 20 años, para hormigón asfáltico e hidráulico.	42
Tabla 4. 7 Efecto Albedo de una estructura de 1 km de pavimento por 20 años, para hormigón asfáltico e hidráulico.	42
Tabla 4. 8 Impacto del consumo de combustible por los vehículos que circularán por la estructura de pavimento durante 20 años.	42
Tabla 4. 9 kg de CO2 emitido por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.....	43
Tabla 4. 10 Agotamiento Abiótico por consumo de combustible, en MJ, por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.	45
Tabla 4. 11 Comparación de resultados de la caracterización para una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico por 20 años.....	48

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Análisis de Ciclo de Vida es una técnica que permite evaluar y mejorar los impactos ambientales de un producto o servicio en toda sus etapas de producción o elaboración (Baumann & Tillman, 2004).

Estudios de Evaluación de Ciclo de Vida para pavimento de carreteras se han realizado desde la década de 1990 (Galatioto, Huang, Parry, Bird, & Bell, 2015) y en los últimos años sus estudios han aumentado, los resultados de los estudios de Análisis de Ciclo de Vida demuestran que los pavimentos tienen un gran impacto ambiental (AzariJafari, Yahia, & Ben Amor, 2016). Para estimar sus impactos ambientales en cada una de sus etapas, se comparan técnicas de construcción y tipo de pavimento utilizado (Anastasiou, Liapis, & Papayianni, 2015) (Inti, Sharma, & Tandon, 2016).

Estudios tradicionales de Análisis de Ciclo de Vida para pavimentos incluyen las etapas que van desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (Celauro, Corriere, Guerrieri, & Lo Casto, 2015). Otros estudios de Análisis de Ciclo de Vida para pavimentos han considerado reciclar y reutilizar el material que conformaba la capa de rodadura (Araújo, Oliveira, & Silva, 2014).

En Europa, los pavimentos de carreteras son en su mayoría pavimentos de hormigón asfáltico, en donde aproximadamente 400 millones de toneladas de asfalto son producidas anualmente y 5.2 millones de kilómetros son cubiertas por asfalto (Giani, Dotelli, Brandini, & Zampori, 2015). Turk, Mauko Pranjić, Mladenović, Cotič, & Jurjavčič, (2016) realizaron la comparación de dos técnicas para rehabilitar un pavimento: la forma tradicional versus el reciclamiento frío in situ, en el que se encontró que la forma denominada tradicional

implicaba un 1% más de impacto en la categoría de calentamiento global, 18% más en acidificación y 15% por agotamiento abiótico en consumo de combustibles.

Para las carreteras de hormigón, los estudios de ACV se han desarrollado en las dos últimas décadas (Smith & Durham, 2016), ya que por su costo inicial, su uso es limitado (Anastasiou et al., 2015). Smith & Durham, (2016) realizaron una investigación relacionada con pavimentos de hormigón para desarrollar un pavimento que con un mayor tiempo de servicio, obtener un diseño de hormigón con el menor costo inicial y que a la vez tenga una menor demanda de energía; para lograr su objetivo reemplazó cemento portland con ceniza volante tipo F hasta en un 40% para alcanzar 23% en disminución de CO₂.

Yu & Lu, 2012 estudiaron dos sistemas de pavimentos diferentes con la finalidad de comparar las cargas ambientales de ambos, en el que la unidad funcional fue 1 km de carretera para un periodo de 40 años. Para consumo de energía, obtuvieron que para un sistema de pavimento rígido la demanda fue 61000 GJ y para un sistema de pavimento de hormigón asfáltico construido con asfalto caliente fue 129000 GJ. La alternativa de pavimento rígido (concreto) fue la de menor carga ambiental con 3872 t de CO₂, 683 kg de CH₄, 3014 kg de NO_x entre otros, y para pavimento de hormigón asfáltico fueron 6730 t, 2275 t y 6421 t respectivamente.

Xu et al. (Xu, Akbarian, Gregory, & Kirchain, 2019) manifiesta que la etapa de uso de la vía, sin importar el tipo de pavimento, tiene una contribución significativa dentro del total de la categoría de calentamiento global del análisis de ciclo de vida, con porcentajes que van del 23% al 61%, mientras que Cao et al. (Cao, Leng, Yu, & Hsu, 2019), determinó que la etapa de uso contribuye de forma significativa en el inventario de consumo de energía.

Las actividades relacionadas a pavimentos son las responsables de la emisión de aproximadamente 17 millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero, lo que

la ubica en segundo lugar de las emisiones relacionadas a las actividades de construcción, después de las edificaciones comerciales y residenciales (Liu, Cui, & Schwartz, 2014).

1.2. Descripción del problema

La estructura vial de un país es parte fundamental en su desarrollo económico, ya que permite el transporte de productos, personas, bienes, servicios, etc. (Anthonissen, Braet, & Van den bergh, 2015). La construcción de carreteras implica un alto consumo de energía e impacto ambiental (AzariJafari, Yahia, & Ben Amor, 2016), ya que, como toda construcción, causarán impactos sobre el ambiente, en cada una de sus etapas (construcción, uso, mantenimiento y disposición final) (Anastasiou et al., 2015). Los impactos ambientales, por sus emisiones, más conocidos debido a estas actividades son la contaminación del aire, agua, suelo; mientras que por la explotación de recursos naturales, es la degradación del suelo (Blankendaal et al., 2014).

En Ecuador la red vial se encuentra aproximadamente en 90 % de pavimento de hormigón asfáltico y un 10% en pavimento de hormigón hidráulico (Banco de Desarrollo del Ecuador, 2013.), actualmente en el país no se dispone de información que permita evaluar el desempeño ambiental de los tipos de pavimentos (hormigón hidráulico y asfáltico), utilizados en la construcción de carreteras. Anastasiou, Liapis, & Papayianni (2015) manifestaron que, aunque los pavimentos de hormigón hidráulico y asfáltico tengan capacidad de servicio similar, tendrán impactos diferentes por su diferentes componentes. Inti, Sharma, & Tandon (2016) determinaron que los pavimentos de asfalto tienen la mayor contribución en al menos cuatro de las categorías de impacto, por lo que en este estudio se espera tener mayor impacto comparativo en los pavimentos de asfalto que en los de hormigón hidráulico.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Comparar los impactos ambientales asociados a una carretera de pavimento de hormigón asfáltico y de pavimento de hormigón hidráulico, determinando cuál de los dos tipos de pavimentos tiene mayor impacto en cada una de las categorías analizadas.

Objetivos específicos:

- Cuantificar los impactos ambientales de una carretera de pavimento de hormigón asfáltico y de pavimento de hormigón hidráulico, causados durante la etapa constructiva, mantenimiento y de remoción de la capa de rodadura.
- Establecer el porcentaje de aportación de cada una de estas etapas para cada categoría de impacto analizada.

1.4. Hipótesis

Se tiene como hipótesis que el tipo de pavimento escogido incide en el impacto ambiental que provoca durante su ciclo de vida.

1.5. Alcance

El trabajo de investigación se basa en los recursos y emisiones, producto de la construcción de una estructura de pavimento para carretera, así como la cuantificación del impacto en las categorías normalmente consideradas en un análisis de ciclo de vida (ACV), las cuales son: Agotamiento Abiótica, Cambio climático, Agotamiento de Capa de Ozono, Acidificación, Eutrofización y Formación de oxidantes fotoquímicas.

Los límites del sistema se pueden dividir en tres fases: construcción, mantenimiento y posterior remoción del pavimento. Estas fases incluyen lo siguiente:

Fase de Construcción

- Preparación y construcción de la base y sub-base
- Preparación del hormigón asfáltico e hidráulico (capa de rodadura)

- Colocación de capa de rodadura

Fase de mantenimiento

- Retiro de la capa de rodadura
- Preparación del hormigón asfáltico e hidráulico (capa de rodadura)
- Colocación de capa de rodadura

Fase de remoción del pavimento

- Retiro de la capa de rodadura
- Disposición final en relleno sanitario

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de pavimento

Pavimento es una estructura diseñada para soportar la carga vehicular que circulará en un período determinado, está formada por capas de diferentes espesores y materiales, cuya rigidez disminuye con la profundidad, debido a que los esfuerzos transmitidos hasta las capas inferiores van disminuyendo. Las capas son de materiales pétreos y una capa superficial que puede ser de hormigón asfáltico o de hormigón hidráulico (Farinango, 2014).

Una estructura de pavimento de hormigón asfáltico está constituida por dos capas de material granular (sub base y base), y la superficie de rodadura es hormigón de tipo asfáltico (American Association of State Highway and Transportation Officials, ASSHTO 1993), el cual está compuesto de una mezcla de bitumen y material granular fino. En Flemish, Bélgica, las plantas de asfalto son responsables del 0.13% de emisiones registradas de CO₂ de acuerdo al EU ETS. En Europa, existen aproximadamente 5.2 millones de kilómetros de vías hechas de asfalto (Giani, Dotelli, Brandini, & Zampori, 2015).

El bitumen es el material ligante de la mezcla asfáltica (Rubio et al., 2012), obtenido de tipos específicos de petróleo; residuo de la destilación del crudo de petróleo, en un proceso realizado a temperaturas de hasta 425 °C, lo que involucra una alta demanda energética (Blankendaal, Schuur, & Voordijk, 2014)

Una estructura de pavimento de hormigón hidráulico está constituida por una capa de material granular (subbase), y la superficie de rodadura es de hormigón hidráulico (Calo, 2010), el cual está compuesto de una mezcla de cemento hidráulico, agua, y agregados finos y gruesos (Smith & Durham, 2016). El hormigón hidráulico o concreto es un compuesto ampliamente usado en muchas construcciones (Blankendaal et al., 2014) y el cemento, que

es el material de construcción más usado en el mundo (Chen, Hong, & Xu, 2015) (Blankendaal et al., 2014), es su principal elemento ligante (Miller, Monteiro, Ostertag, & Horvath, 2016) (Blankendaal et al., 2014); y es el responsable del 5% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (Wu, Xia, & Zhao, 2014).

Del cemento, su mayor aportación de CO₂ está relacionado con el proceso de clinkerización (Smith & Durham, 2016), por el uso de combustible (García-Gusano, Herrera, Garraín, Lechón, & Cabal, 2015), por lo que, un cemento con menor contenido de Clinker, tendrá menor emisión de CO₂ por tonelada de cemento producida (Miller et al., 2016). El reemplazo de Clinker se realiza con los denominados componentes minerales (Anastasiou, Liapis, & Papayianni, 2015)(Miller et al., 2016) que pueden ser naturales (puzolana) y artificiales (escoria granulada de alto horno, humo sílice, etc.), siendo estas últimas, residuos contaminantes de otros procesos, que son aprovechados en la industria del cemento (Chen et al., 2015).

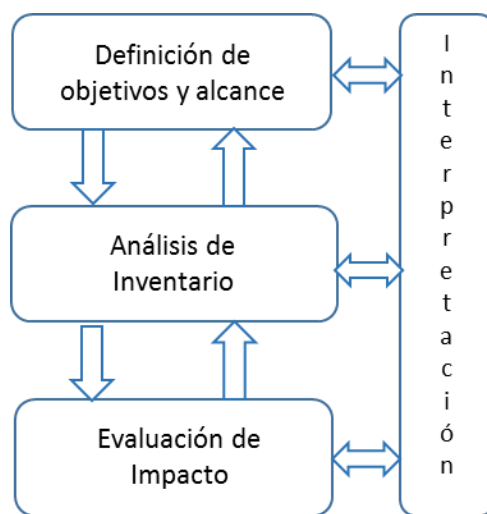
Las actividades de minería (material pétreo, agregados), de acuerdo a estudios de análisis de ciclo de vida han determinado que para producir una tonelada de agregado fino de río (arena), se tiene una emisión de 23 kg de CO₂ equivalente y para agregado grueso triturado (grava) se tiene 33 kg de CO₂ equivalente (Herrmann & Moltesen, 2015).

2.2. Análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un método de evaluación de impacto ambiental de un determinado producto o servicio, en el que se consideran todas sus etapas, es decir, desde su producción (cuna), pasando por la etapa de uso o ejecución, hasta llegar a su fin de vida útil (tumba) según lo especificado en las normas ISO 14042 e ISO 14043.

Para determinar el nivel de impacto, se han definido diferentes categorías, las cuales cuantifican las emisiones en función de la unidad funcional definida (Ramachandran, Bryan, White, & Reddy, 2013).

La norma ISO 14040:2006 indica las fases en las que debe desarrollarse un Análisis de Ciclo de Vida, cuyo esquema se observa en la Fig. 2.1; en la primera fase debe definirse el producto que será analizado y los objetivos del estudio, luego, en la parte del Análisis del inventario corresponde al uso de recursos y las emisiones para las fases del ciclo de vida del producto. En la fase de Evaluación de Impacto, las emisiones son asociadas a las diferentes categorías establecidas para el método. En la etapa de interpretación, con el cómputo de los resultados, se procede a establecer la categoría que resulta más afectada y la etapa de mayor impacto dentro de su ciclo de vida.



Fuente y elaboración: ISO 14020:2006

Fig. 2. 1 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida

2.2.1. Objetivo y Alcance

De acuerdo a la norma ISO 14040, el objetivo de un Análisis de Ciclo de Vida describe la aplicación e intención del estudio, los resultados que busca obtener y la audiencia a quién serán dirigidos los resultados. Basado en el objetivo, el alcance describe el sistema del

producto a ser estudiado, unidad funcional, límites del sistema, selección de las categorías de impacto, etc.

2.2.1.1 Unidad Funcional

Será la unidad de referencia y permitirá que los resultados obtenidos, de diferentes análisis, sean comparables. En el caso de pavimentos de calles o carreteras, su unidad funcional se define por su geometría, el tiempo para el cual se ha diseñado y el tráfico que soportará. Adicional a estas consideraciones, para poder compararlas, las alternativas de carreteras deberán tener el mismo ancho y longitud (Araujo, Oliveira & Silva, 2014).

Su principal función es referenciar el sistema que será analizado, además normaliza las entradas y salidas con respecto a esta unidad, razón por la cual la unidad funcional debe ser numérica.

2.2.1.2 Selección de las categorías de impacto ambiental

Debido a que la norma ISO generaliza las categorías de impacto en: uso de recursos, consecuencias ecológicas y salud humana, estas deberán ser descritas en forma más específicas, por ejemplo: calentamiento global, acidificación, etc.

Las categorías de impacto seleccionadas deben reflejar todo un conjunto de temas ambientales, en base al alcance del estudio.

Se considerarán las categorías de impactos ambientales citados en el Manual Holandés de Evaluación de Ciclo de Vida (CML 2002), de los que se seleccionarán las que se necesite de acuerdo a la evaluación que se realice. El inventario que se realizará dependerá de las categorías de impacto seleccionadas, que de acuerdo a la norma ISO 14044: (Baumann & Tillman, 2004)

-Deberán representar los impactos acumulados de las entradas y salidas del sistema del producto.

- Ser aceptadas globalmente.
- Evitar doble conteo.
- Su indicador debe ser ambientalmente relevante.

2.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida.

El análisis de inventario del ciclo de vida depende de la definición y alcance del análisis de ciclo de vida y de los límites del sistema establecido (ISO 14044, 2006), implica la recopilación de información y cálculos para cuantificar las entradas y salidas, las cuales involucran el consumo de recursos y emisiones al aire, suelo y agua.

Realizar un inventario de ciclo resulta un proceso dinámico, ya que, durante la recopilación de datos, es posible determinar nuevas condiciones que indiquen un cambio en los objetivos del estudio (ISO 14040, 2006).

Los datos, cualitativos y cuantitativos, deben ser determinados para cada una de las etapas o procesos establecidos dentro del sistema, y los procedimientos utilizados para su obtención están en función del alcance.

2.2.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida.

La evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) tiene como objetivo evaluar la magnitud de cada una de las categorías de impacto previamente seleccionadas, en base a los resultados del inventario de ciclo de vida (ICV), a la vez que permite reducir los parámetros del ICV a un grupo menor de categorías de impactos ambientales, con lo que se obtiene resultados más comparables (Baumann & Tillman, 2004). Una EICV debe ser cuidadosamente planeada para cumplir con el objetivo y alcance de un estudio de evaluación del ciclo de vida. La realización de la evaluación incluye (ISO 14040, 2006) (ISO 14042, 2006):

- Selección de las categorías de impacto, modelos de caracterización, y los indicadores de categoría.

- Asignación de los resultados del inventario de ciclo de vida: son asignados a las diferentes categorías de impacto, lo cual implica conocer sobre los contaminantes y recursos conforman una categoría en específico.
- Cálculo de los resultados de los indicadores de categoría, en la que los factores de equivalencia son utilizados para realizar los cálculos y convertir los resultados del ICV en resultados con una misma unidad.
- Resultados de los indicadores de categoría, resultados de la evaluación de análisis de ciclo de vida

2.2.3.1 Categorías De Impacto De Ciclo De Vida.

Potencial de Agotamiento de Recursos.

Los recursos no renovables son los que se analizan en esta categoría de impacto, específicamente los clasificados como **abióticos**, es decir, que no son organismos vivos o biológicos, encuentran separados en dos categorías: el relacionado a consumo de minerales, de recursos metálicos (Beylot, Ardente, Sala, & Zampori, 2020), piedras de origen natural (Schulze et al., 2020) expresados en kg de Sb equivalente por unidad funcional; y el relacionado al consumo de combustibles fósiles, que involucra a los combustibles como petróleo, gas natural y carbón, los cuales contienen energía, su total se expresa en términos de energía como Megajoules (MJ) (van Oers, de Koning, Guinée, & Huppel, 2002) y su impacto se define como **Agotamiento por consumo de combustibles fósiles** (van Oers & Guinée, 2016).

Potencial de Calentamiento Global (GWP).

Relacionado con el incremento de temperatura de la atmósfera, debido al efecto invernadero, se expresa en kg de CO₂ equivalente por unidad funcional e incluye a los gases de efecto invernadero. (Ramachandran, Bryan, White, & Reddy, 2013)

Potencial de Acidificación (AP).

Determina la contribución de un producto a la acidificación del medio ambiente y junto a GWP, es de alto interés para la evaluación de desempeño ambiental de los materiales para construcción. Se expresa como kg equivalentes de SO₂ por unidad funcional. (Estokova, Vilcekova, & Porhincak, 2017)

Potencial de Eutrofización.

Es el incremento de nutrientes (nitrógeno y/o fósforo) en el suelo o agua, causando un incremento en el crecimiento de organismos e incremento en la demanda biológica de oxígeno y en la reducción de oxígeno disuelto. Se expresa en kg P₂O₄ equivalente por unidad funcional. (Ramachandran et al., 2013)

Potencial de Agotamiento de la capa de ozono.

Se expresa en kg de CFC – 11 equivalentes por unidad funcional, es la disminución de la capa de ozono, producto de las emisiones de halocarbonos relacionada con un producto (Ramachandran et al., 2013) y por radiación ultravioleta (UV), luz visible y sustancias que actúan como catalizadores: H, OH, NO, Cl y Br (Baumann & Tillman, 2004).

Potencial de Oxidación Fotoquímica.

Se presenta por medio de la formación de smog fotoquímico, que se forma en la parte inferior de la atmósfera a partir de NO_x y de compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz solar, siendo el ozono troposférico uno de los principales compuestos en formarse, junto a varios aldehídos. Se expresa en kg de C₂H₄ (etileno) equivalentes por unidad funcional (Baumann & Tillman, 2004).

2.2.4 Interpretación del ciclo de vida.

La interpretación del ciclo de vida, según ISO 14040, es “la fase en que los hallazgos del inventario de ciclo de vida y la evaluación del impacto se relacionan o, en el caso de estudios

de ICV, solo sus hallazgos son relacionados”, presentando los resultados de la ECV de una manera comprensible, relacionados con el objetivo y alcance definido.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

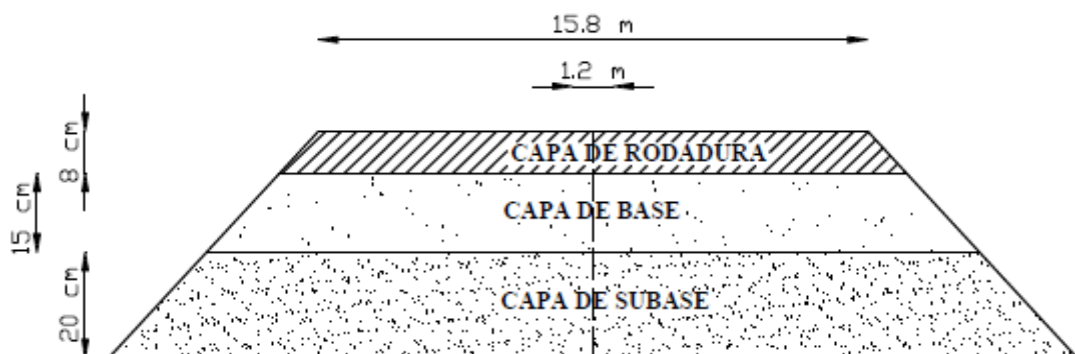
3.1 Definición de Unidad Funcional y de Límites del Sistema.

3.1.1 Definición de unidad funcional

La unidad funcional de la presente investigación se define como “la construcción, uso, mantenimiento y disposición final de 1 km de carretera, de 15.8 metros de ancho y que soportará el tránsito de 27300 vehículos livianos y 5600 vehículos pesados por día, para un período de 20 años. El diseño de la vía considera una tasa de incremento anual de 2.62% para vehículos livianos y 2.01% para vehículos pesados.

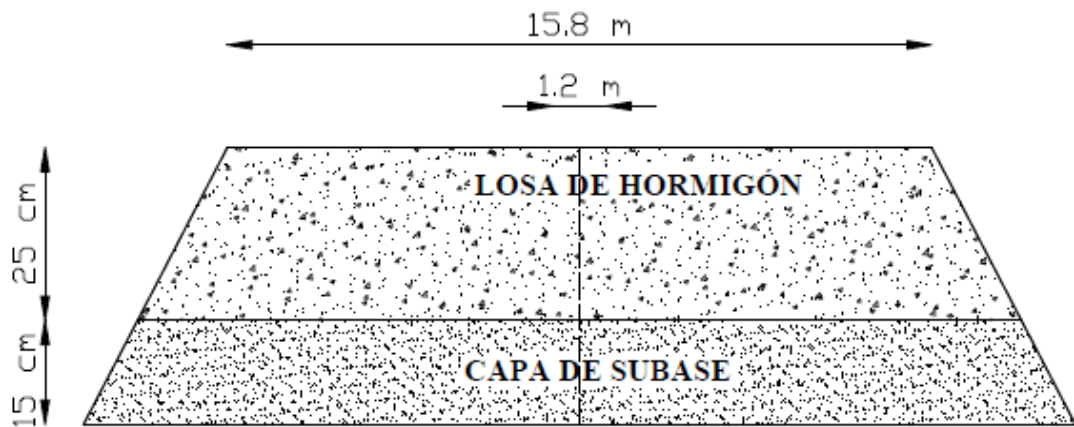
La estructura de los pavimentos en cuestión es la típica utilizada para pavimentos de hormigón asfáltico (sub base y base granular, capa de rodadura de asfalto) y de hormigón hidráulico (sub base granular y capa de rodadura de hormigón de cemento portland).

Para esta investigación la vía cuenta con 2 carriles en cada sentido, un parterre central, bordillos, cunetas y estructuras de drenaje. Las Fig. 3.1 y 3.2 detallan las dimensiones de la sección transversal para las estructuras pavimento con hormigón asfáltico e hidráulico, las cuales serán capaces de soportar el tráfico proyectado para 20 años.



Fuente y elaboración: Farinango, 2014

Fig. 3.1 Sección transversal de un pavimento de hormigón asfáltico.



Fuente y elaboración: Farinango, 2014

Fig. 3. 2 Sección transversal de un pavimento de hormigón hidráulico

3.1.2 Descripción y Límites de los Sistemas.

Al definir los sistemas se indica cuáles son los procesos que se incluyen en la evaluación del ciclo de vida. Los sistemas se dividen en los procesos que incluyen los materiales y componentes que forman parte del pavimento que se analiza. El sistema para este estudio se puede dividir en 5 fases: Producción de materiales, construcción del pavimento, uso, mantenimiento y fin de vida útil (Butt, Toller, & Birgisson, 2015).

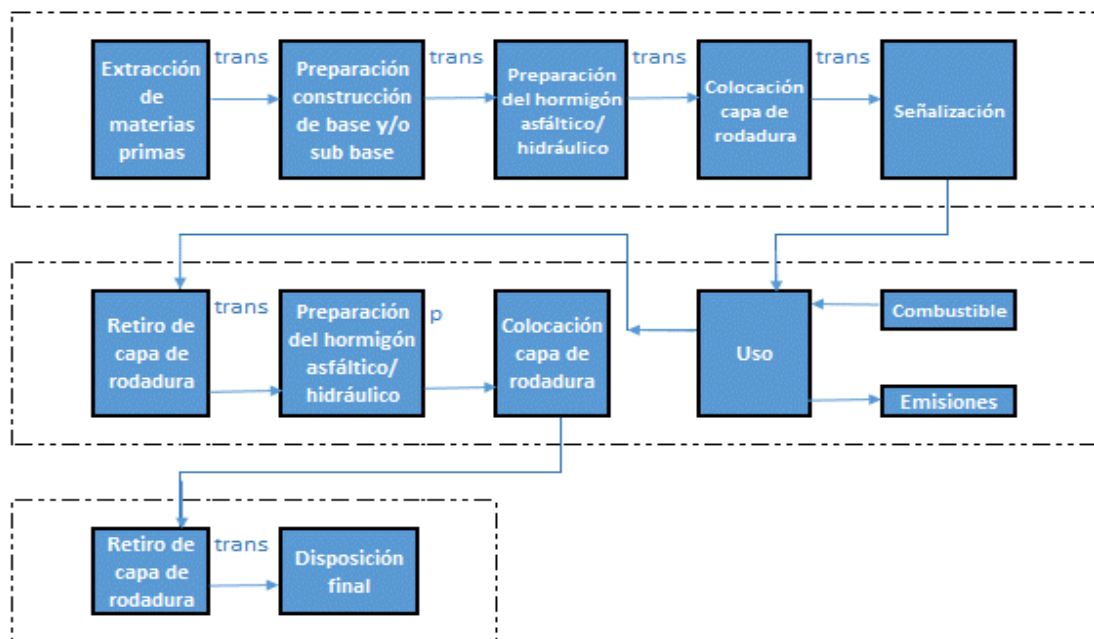


Fig. 3. 3 Límites del sistema para el Análisis del Ciclo de Vida

3.1.3 Obtención de los datos.

Para lograr obtener información precisa que nos permita elaborar un inventario del ciclo de vida, para la estructura de pavimento, se usarán los rubros del presupuesto para la construcción de la carretera, tanto como de hormigón asfáltico, como de hormigón hidráulico; la carretera estará a 20 km de Guayaquil.

3.2 Definición de las etapas a considerar en la Evaluación de Ciclo de Vida

3.2.1 Etapa de construcción.

Para esta etapa se considera la extracción de las materias primas, la preparación de los materiales en las plantas, que serán trasladados al sitio de construcción de la carretera. Para estructura de pavimento de hormigón asfáltico se requiere material pétreo que cumpla las especificaciones del MTOP, para ser usado como sub base y base, agregado grueso y bitumen para la preparación del concreto asfáltico, que es la capa de rodadura, mientras que para un pavimento de hormigón hidráulico, se requerirá agregados para la sub base, cemento y agregados grueso y fino para el hormigón hidráulico (de cemento Portland), en ambos casos (tipos de pavimento) se requiere datos de la energía empleada por la maquinaria para la colocación de cada una de las capas de la estructura, construcción de las obras complementarias consideradas en este estudio, y se considera que la carretera se construirá con materiales vírgenes. Las tablas 3.1 y 3.2 detallan los rubros con los materiales y operaciones correspondientes a la construcción de 1 km de una estructura de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico respectivamente.

Tabla 3.1 Datos de inventario para la construcción para 1 km de carretera de hormigón hidráulico para 20 años

CÓD	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD/km
1	Obra Básica o Plataforma		
	Desbroce, Desbosque y Limpieza	Ha	2.36
	Remoción y desalojo de viviendas	m3	495.69
	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km	1.00
	Excavación en suelo sin clasificar	m3	157148.61
	Relleno con material de préstamo local	m3	34873.09
2	Pavimento de Hormigón Hidráulico		
	Sub base clase 2	m3	2369.99
	Pavimento de hormigón clase "A", $f_c=350$ kg/cm ²	m3	3949.98
	Acero de refuerzo para unión, $\Phi=32$ mm, $f_y=4200$ kg/cm ²	kg	11171.09
	Acero de refuerzo en pasadores, $\Phi=32$ mm, $f_y=4200$ kg/cm ²	kg	50968.10
	Curador	m ²	14553.22
	Juntas simuladas	m	5276.79
	Hormigón simple para bordillos y parterre, $f_c=180$ kg/cm ²	m	1196.15
3	Drenajes		
	Excavación y relleno para estructuras menores	m3	377.68
	Excavación y relleno en cunetas	m3	789.21
	Hormigón simple $f_c=180$ kg/cm ² (cunetas)	m3	11.36
	Hormigón estructural $f_c=210$ kg/cm ² (colectores)	m3	33.57
	Acero de refuerzo en barras y colectores $f_c=4200$ kg/cm ²	kg	313.27
	Tubería de hormigón centrifugado de 250 mm clase 2	m	395.27
	Tubería de hormigón centrifugado de 300 mm clase 2	m	238.67
	Tubería de hormigón centrifugado de 350 mm clase 2	m	192.21

	Tubería de hormigón centrifugado de 400 mm clase 2	m	85.57
	Tubería de hormigón centrifugado de 450 mm clase 2	m	35.92
	Tubería de hormigón centrifugado de 500 mm clase 2	m	14.69
	Tubería de hormigón centrifugado de 550 mm clase 2	m	13.73
	Pozo de Revisión Tipo A de 1,20 a 2,00 m	u	37.36
	Sumideros de calzada	u	134.58
4	Señalización Horizontal y Vertical		
	Señales a lado de la carretera	u	47.09
	Marcas de pavimento	m	1993.59

Fuente y Elaboración: Farinango, 2014

Tabla 3. 2 Datos de inventario para la construcción de 1 km de carretera de hormigón asfáltico para 20 años.

CÓD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD/km
1	Obra Básica o Plataforma		
	Desbroce, Desbosque y Limpieza	Ha	2.36
	Remoción y desalojo de viviendas	m ³	495.69
	Replanteo y nivelación con equipo topográfico	km	1.00
	Excavación en suelo sin clasificar	m ³	157148.61
	Relleno con material de préstamo local	m ³	34873.09
2	Pavimento de Hormigón Asfáltico		
	Asfalto de imprimación	m ²	15799.92
	Capa de sub-base clase 2	m ³	3159.99
	Capa de base clase 2	m ³	2369.99
	Capa de rodadura de hormigón asfáltico	m ²	15799.92
	Hormigón simple para bordillos f _c = 180 kg/cm ²	m	1196.15
3	Drenajes		
	Excavación y relleno para estructuras menores	m ³	377.68
	Excavación y relleno en cunetas	m ³	789.21
	Hormigón simple f _c =180 kg/cm ² (cunetas)	m ³	11.36

	Hormigón estructural $f_c=210$ kg/cm ² (colectores)	m ³	33.57
	Acero de refuerzo $f_c=4200$ kg/cm ²	kg	313.27
	Tubería de hormigón centrifugado de 250 mm clase 2	m	395.27
	Tubería de hormigón centrifugado de 300 mm clase 2	m	238.67
	Tubería de hormigón centrifugado de 350 mm clase 2	m	192.21
	Tubería de hormigón centrifugado de 400 mm clase 2	m	85.57
	Tubería de hormigón centrifugado de 450 mm clase 2	m	35.92
	Tubería de hormigón centrifugado de 500 mm clase 2	m	14.69
	Tubería de hormigón centrifugado de 550 mm clase 2	m	13.73
	Pozo de Revisión Tipo A de 1,20 a 2,00 m	u	37.36
	Sumideros de calzada 0.45 x 0.55	u	134.58
4	Señalización Horizontal y Vertical		
	Señales a lado de la carretera	u	47.09
	Marcas de pavimento	m	1993.59

Fuente y Elaboración: Farinango, 2014

3.2.2 Etapa de uso.

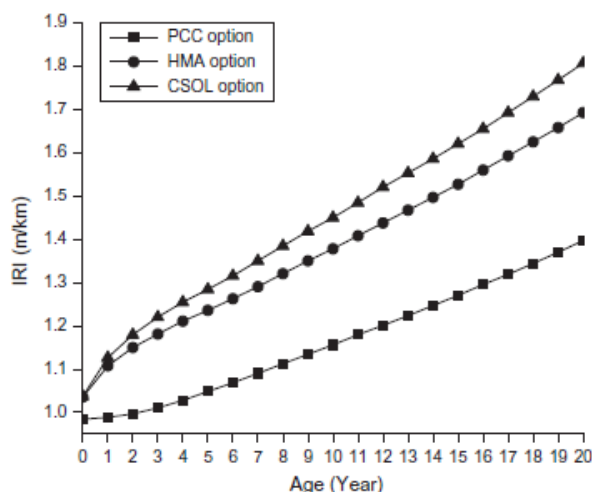
En la etapa de uso, que es frecuentemente no considerada (Azarijafari, Yahia, & Ben Amor, 2016), las cargas ambientales son debido al consumo de combustible y sus emisiones (Vidal, Moliner, Martínez, & Rubio, 2013).

3.2.2.1 Uso de combustible.

Estudios consideran que la etapa de uso es la que genera mayor impacto, superando al generado en la etapa de construcción en demanda de energía (Turk, Mauko Pranjić, Mladenović, Cotič, & Jurjavčič, 2016), donde se considera que es la que mayor contribución tiene a la categoría de calentamiento global por las emisiones al aire (Yu & Lu, 2012) debido al uso de combustible, siendo la rugosidad de la superficie es uno de los parámetros más

significativos en el análisis de ciclo de vida, para lo cual se utiliza el índice de rugosidad IRI, el cual aumenta con la edad del pavimento (Yu, 2013).

La figura 3.4 presenta una relación entre la edad del pavimento y la rugosidad del pavimento que se elaboró con el uso del software MEPDG (Yu, 2013).



Fuente y elaboración: (Yu, 2013)

Fig. 3. 4 Relación entre la edad del pavimento y la rugosidad

El aumento del factor IRI aumenta el consumo de combustible, el cual relaciona el factor de consumo con factor IRI (Yu, Lu, & Xu, 2013):

Ec. 3.1 $FCC = 7.377 \cdot 10^{-3} \cdot IRI + 0.993$ para el vehículos livianos

Ec. 3.2 $FCC = 2.163 \cdot 10^{-2} \cdot IRI + 0.953$ para vehículos pesados

$FCC > 1.0$ (Zhang, Keoleian, & Lepech, 2008)

3.2.2.2 Efecto Albedo.

Aspecto generalmente ignorado en los estudios de la etapa de uso (Yu & Lu, 2014), es el reflejo de la luz solar, que está relacionado con la categoría de calentamiento climático (Susca, 2012). Incremento en valores de albedo conlleva a disminución en el efecto de isla de calor, y también disminución en la fuerza directa de radiación (Azarijafari et al., 2016). Está influenciado por el tipo y la edad del pavimento, para pavimentos de hormigón asfáltico tiende a aumentar con la edad, y en el pavimento de hormigón hidráulico a disminuir con la

edad (Araújo, Oliveira, & Silva, 2014). Bin Yu et. Al estableció una ecuación que correlaciona el albedo y el CO2 (Yu & Lu, 2014) de la siguiente manera:

Ec. 3.3

$$CO_2[kg] = \frac{\Delta\alpha}{0.01} \times \frac{1.087x RF x A}{0.217t - 44.78e^{-t/172.9} - 6.26e^{-t/18.51} - 0.22e^{-t/1.186} + 51.26}$$

A= Área del pavimento

RF = variación del forzamiento radiativo cuando el albedo varía en 0.01 (-1.54 W/m2)

$\Delta\alpha$ = variación del albedo del material (hormigón, asfalto),

t = tiempo en años del pavimento

3.2.2.3 Carbonatación.

Es el consumo de CO2, de la atmósfera, que realiza el concreto de una estructura, durante su ciclo de vida (Yang, Seo, & Tae, 2014); debido a que los hidróxido presentes en el hormigón reaccionan con el dióxido de carbono del aire o agua para formar carbonato de calcio. La carbonatación produce una pasta cementante más resistente (Cui, Tang, Liu, Dong, & Xing, 2015). De acuerdo a Azari Jafari et. Al, muchas estimaciones de CO2 consumido por el hormigón (kg de CO2), se calculan usando la ecuación de la primera Ley de difusión de Fick:

Ec. 3.4

$$CO_2 = k * \sqrt{t} * A * \rho_{concreto} * m_{cemento/concreto} * \frac{M_{CO2}}{M_{CaO}} * \varepsilon$$

K: Coeficiente de velocidad de carbonatación, mm $\sqrt{años}$,

t: Edad, años

A: área expuesta del hormigón hidráulico, m²

$\rho_{concreto}$: Densidad de hormigón hidráulico, kg/m³

$m_{cemento/concreto}$: Es la relación de masa del cemento en el hormigón hidráulico

M_{CaO} : Masa molar de óxido de calcio, g/mol

M_{CO_2} : Masa molar de dióxido de carbono, g/mol

ε : Proporción de CaO que puede ser carbonatado,

3.2.3 Etapa de mantenimiento.

En esta fase, que es considerada en aproximadamente el 90% de los ECV, se requiere conocer la energía utilizada para producir materiales nuevos, transporte, reemplazo y colocación de material. Esta etapa incluye las actividades requeridas para mantener la serviciabilidad de la carretera y condiciones seguras (capacidad de carga, superficie regular y fricción) (Celauro, Corriere, Guerrieri, & Lo Casto, 2015), las cuales tienen sus impactos ambientales (Inyim, Pereyra, Bienvenu, & Mostafavi, 2016). El tiempo estimado para realizar mantenimiento dependerá de las estrategias definidas en cada país, por ejemplo: en Alemania, el mantenimiento dependerá de las características superficiales y defectos estructurales que presente la estructura (Jullien, Dauvergne, & Cerezo, 2014).

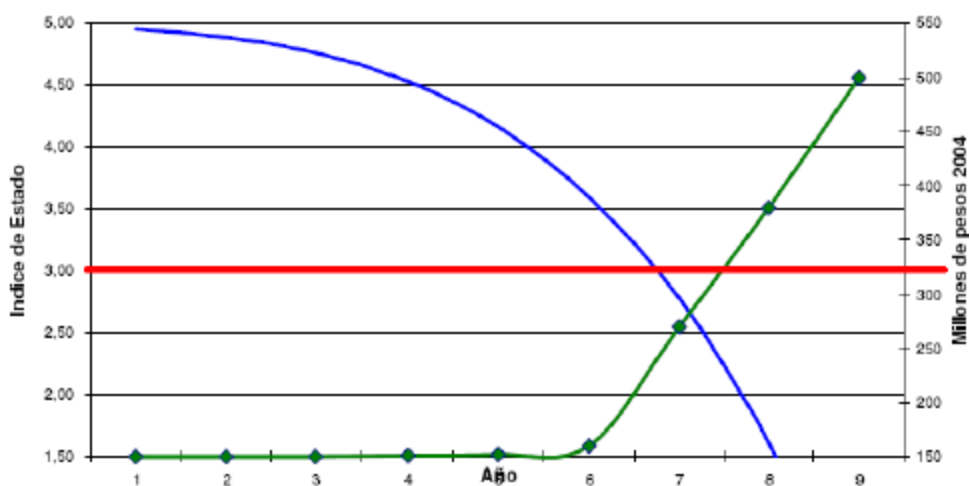
De acuerdo al Plan de mantenimiento por niveles de servicio de la Dirección de Conservación del Transporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Ecuador (MTOP, 2012) el mantenimiento de la vía se realizará cuando la capa de rodadura alcance un nivel de 5 en la escala IRI de rugosidad (R), la cual, en base a la correlación establecida por el Banco Mundial (Rodríguez, 1999), equivale a un índice de serviciabilidad (PSI) de 2.0.

$$\text{Ec. 3.5} \quad R = 5.5 * \ln (5/\text{PSI})$$

R: Rugosidad en unidades IRI

PSI: Índice de Serviciabilidad Presente (Índice de Estado)

Salazar (Alexis & Alava, 2011) realizó un estudio para disminuir costos de mantenimiento de carreteras, y usó la Política Integral De Infraestructura Vial Del Ministerio De Transporte De Colombia como base de su estudio, para determinar los tiempos adecuados para la realización de los trabajos en base a una estimación del deterioro de la carpeta de rodadura con respecto al tiempo, para un valor de índice de estado se considera un tiempo de 6.7 años para reemplazo de la carpeta asfáltica. Así mismo detalla que, para una capa de rodadura de hormigón hidráulico, los trabajos de reposición o mantenimiento se programan para períodos de más de 20 años.



Fuente: Ministerio de Transporte de Colombia, (2004) "Política Integral de infraestructura Vial", Bogotá

Fuente y elaboración: Ministerio de Transporte de Colombia

Fig. 3. 5 Relación entre la edad del pavimento y su Índice de Serviciabilidad Presente (Índice de Estado)

Para un pavimento con hormigón, según Osuna, el mantenimiento usual consiste en subsanar las juntas a intervalos de 5 a 10 años.

3.2.4 Etapa de fin de vida útil.

En esta fase, el pavimento ha alcanzado el tiempo para el cual fue diseñado e incluye, básicamente, las actividades de remoción de la capa de rodadura (hormigón asfáltico o hidráulico) para ser reciclada y colocada nuevamente como agregado en el hormigón

hidráulico o asfáltico, debido a que los materiales de las capas de base y/o sub base pueden permanecer en sitio para seguir siendo usada.

3.3 Análisis De Inventario Del Ciclo De Vida

La información usada para realizar el inventario ciclo de vida se obtuvo de las bases de datos Ecoinvent, en base a los límites del sistema de los pavimentos de hormigón hidráulico y asfáltico presentado en la figura 3.1, en donde se describen cada una de las fases del tiempo de vida del elemento de estudio, desde la extracción de las materias primas, materiales utilizados en la construcción de los diferentes componentes de la estructura del pavimento, uso de la vía, mantenimiento, y disposición final.

3.3.1 Inventario para la etapa de construcción.

Para realizar el inventario de la etapa de construcción se consideraron los materiales utilizados, que dependerán del tipo de pavimento, tal como se describió en las Fig. 3.2 y 3.3. Las cantidades y tipos de materiales fueron calculados en base a los procedimientos ASSHTO para el pavimento de hormigón asfáltico y PCA para el pavimento de hormigón hidráulico (Farinango, 2014) y cumplen con las especificaciones técnicas del MTOP.

Los rubros para la construcción de la carretera con las cantidades y unidades correspondientes, que se presentan en las tablas 3.1 y 3.2 (Farinango, 2014), son expuestos en bases al análisis de precios unitarios realizado luego de determinar tipos y cantidades de materiales. Estos rubros fueron ordenados en el programa Sima Pro 8, para seleccionar el proceso correspondiente de las bases de datos de Ecoinvent.

Tabla 3.3 Fuentes de datos para la construcción de un 1 km de pavimento hidráulico y asfáltico para 20 años.

MATERIAL/EQUIPO	NOMBRE DEL PROCESO	FUENTE
Tractor de Oruga	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador

Equipo de topografía	Wholesale trade	USA Input/Output Database
Volqueta 8 m3	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
excavadora sobre orugas	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
rodillo vibratorio	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
rodillo compactador	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
motoniveladora	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
excavadora	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
tanquero	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
lastre	Sand, at mine/CH U	Ecoinvent unit processes
sub base clase 2	Gravel, crushed, at mine/CH U	Ecoinvent unit processes
base clase 2	Gravel, crushed, at mine/CH U	Ecoinvent unit processes
concretera y vibrador	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
Arena	Sand {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, default unit
Caliza	Limestone, crushed, washed {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, default unit
Cemento	Cement, pozzolana and fly ash 15-40%, US only {US} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, default unit
Acero de refuerzo	Reinforcing steel, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes
Alambre de amarre	Wire drawing, steel/RER U	Ecoinvent unit processes
Compactador manual	Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	Electricity Ecuador
Material Granular	Gravel 2/32, wet and dry quarry, production mix, at plant, undried RER S	ELCD
Transporte acero	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	USLCI
Tubería 250 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Tubería 300 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD

Tubería 350 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Tubería 400 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
MATERIAL/EQUIPO	NOMBRE DEL PROCESO	FUENTE
Tubería 450 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Tubería 500 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Tubería 550 mm	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Sumidero prefabricado de calzada	Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER	ELCD
Transporte cemento/tubos	Transport, combination truck, diesel powered/US	USLCI
Pintura de tráfico	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes
Cordón	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, default unit
Sellante	Polysulfide, sealing compound {RER} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, default unit
Cortadora	Diesel, burned in building machine/GLO U	Ecoinvent unit processes
Pintura replanteo	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes
Estacas	Fuel wood, softwood, green, at sawmill, NE-NC/kg/RNA	USLCI

3.3.2 Inventario para la etapa de uso.

Para esta etapa, se considera el tráfico total que soportará la vía durante su tiempo de vida útil, (tabla 3.4) En esta etapa también se considera la carbonatación y el efecto albedo para un periodo de 20 años. Para cuantificar el efecto albedo se usará la ecuación obtenida por Bin Yu & Qing Lu, partiendo de un valor de albedo del terreno natural, el cual está cubierto

por pastizales de mediana altura corresponde un albedo de 0.2 (Coakley, 2003), en la tabla 3.5 se muestran los valores típicos para el albedo (Bin Yu & Qing Lu) para los diferentes tipos de pavimento, mientras que para carbonatación, el coeficiente de difusión de Dirk es de 4.9 mm/ $\sqrt{\text{año}}$. Los valores obtenidos para el efecto albedo y de carbonatación serán sumados o restados a la categoría de Potencial de Calentamiento Global.

Tabla 3.4 Tráfico estimado que soportará la estructura de pavimento durante 20 años.

Edad años	Livianos Día	Pesados Día	Total Día	Livianos Año	Pesados Año	Total Año
1	16258	3760	20018	5934170	1372400	7306570
2	17121	3913	21034	6249194	1428125	7677319
3	17570	3991	21561	6412923	1456830	7869753
4	18030	4072	22102	6580941	1486113	8067054
6	18987	4237	23224	6930300	1546455	8476755
7	19485	4322	23807	7111874	1577538	8689412
8	19995	4409	24404	7298205	1609247	8907452
9	20519	4498	25016	7489418	1641593	9131011
10	21057	4588	25644	7685641	1674589	9360230
11	21608	4680	26288	7887005	1708248	9595253
12	22174	4774	26949	8093644	1742584	9836228
13	22755	4870	27625	8305698	1777610	10083307
14	23352	4968	28320	8523307	1813340	10336647
15	23963	5068	29031	8746618	1849788	10596405
16	24591	5170	29761	8975779	1886969	10862748
17	25235	5274	30509	9210944	1924897	11135841

18	25897	5380	31276	9452271	1963587	11415858
Edad	Livianos	Pesados	Total	Livianos	Pesados	Total
años	Día	Día	Día	Año	Año	Año
19	26575	5488	32063	9699921	2003055	11702976
20	27271	5598	32870	9954059	2043317	11997375
TOTAL DE VEHÍCULOS EN 20 AÑOS:				157295273	34022266	191317539

Fuente: Farinango, 2014

Tabla 3. 5 Valores de albedo para diferentes tipos de superficie de pavimento.

Albedo	
Hormigón Asfáltico	Hormigón Hidráulico
0.05 - 0.15	0.20 - 0.40

Fuente: Bin Yu & Qing Lu

Un aspecto importante a considerar en la etapa de uso es el consumo de combustible y sus emisiones, en el que se considera el número de vehículos, detallados en la tabla 3.4, que circularán en la vía durante los 20 años. El consumo se ve afectado por la rugosidad del pavimento (IRI, PSI) y este dependerá de la antigüedad de la vía (Azarijafari et al., 2016). Para los diferentes consumos de combustible se considerará las variaciones de los valores IRI de la Fig. 3.4 para pavimento de hormigón hidráulico. Para el pavimento de hormigón asfáltico se usarán los valores de Índice de Estado de la Fig. 3.4 para determinar los valores IRI, utilizando la ecuación 3.5. A partir de los valores IRI se determinará el consumo de combustible, con el respectivo factor de variación de consumo por la variación de la rugosidad, por medio de las Ec. 3.1 y 3.2.

3.3.3 Inventario para la etapa de mantenimiento.

Para el pavimento de con hormigón asfáltico se considera que cada 6.6 años habrá recapeo de acuerdo al plan de mantenimiento vial del MTOP, y que, con esto disminuirá la rugosidad que reflejará una reducción en el consumo de combustible, se considerarán las actividades

de elaboración y colocación de la capa de hormigón asfáltico de la etapa de construcción; esto también influirá en el efecto albedo. Para el pavimento con hormigón hidráulico se considera un mantenimiento en las juntas cada cinco años y que no requerirá levantar la losa de hormigón en este período.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de construcción.

4.1.1 Pavimento de hormigón asfáltico.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos para la etapa de construcción, por km, del sistema de pavimento de hormigón asfáltico (flexible) para 20 años, en que se consideró lo mostrado en la tabla 3.2.

Tabla 4. 1 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	Total
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.03
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	3520666
Calentamiento Global	kg CO2 eq	2911769
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.59
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	533
Acidificación	kg SO2 eq	15239
Eutrofización	kg PO4--- eq	4104

En la Fig. 4.1 se presenta la contribución de los procesos constructivos y materiales involucrados en la construcción de la carretera con pavimento de hormigón asfáltico. Para la categoría de agotamiento abiótico casi toda la contribución a este impacto está dado por el hormigón que se usará para los drenajes, en un 99.5%, esto se debe principalmente al agregado grueso y fino que se usa para la preparación del hormigón, sumado al uso de caliza y otros correctivos minerales para la fabricación de cemento.

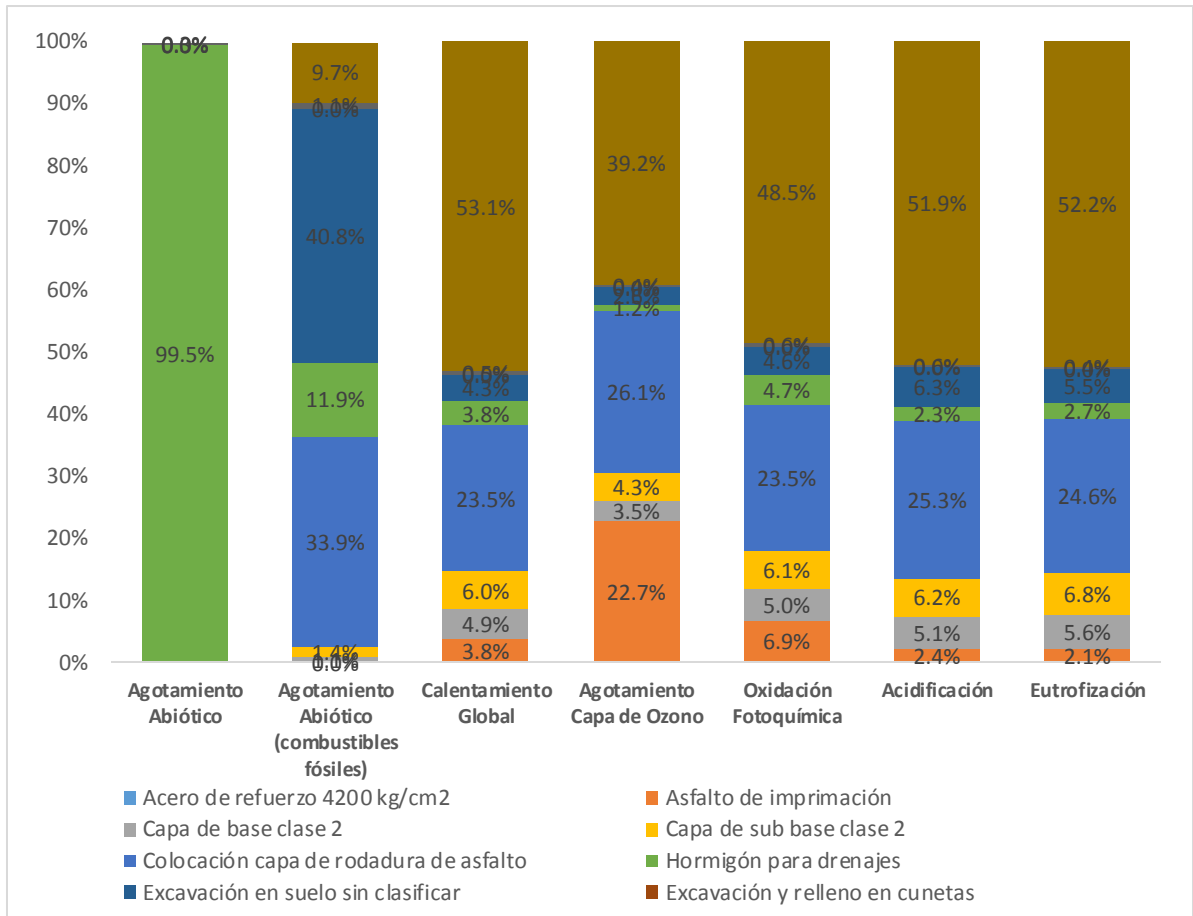


Fig. 4. 1 Análisis de contribución de los procesos y materiales para la etapa de construcción de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.

Para la categoría de agotamiento abiótico por consumo de combustibles fósiles se observa que los mayores contribuyentes al impacto son: excavación de suelo sin clasificar con 41%, colocación de capa de rodadura de asfalto con 34% y hormigón para drenajes con 12%; en el caso del hormigón se debe al combustible utilizado para la fabricación de Clinker de cemento y para los dos procesos, por el consumo de combustible de maquinaria y para calentamiento de la emulsión asfáltica. Para la categoría de acidificación se tiene que los mayores contribuyentes al impacto son: Relleno con material pétreo con 52%, actividades de excavación con 7%, colocación de capa de rodadura de asfalto con 25% y las capas de base y sub-base de material pétreo con 5% y 6% respectivamente, esto debido al consumo de combustible de la maquinaria y equipo involucrado en la extracción, preparación,

transporte y colocación en el lugar de los trabajos. En la categoría de eutrofización, los mayores contribuyentes al impacto son: relleno con material pétreo con 51%, excavación de suelo sin clasificar con 5%, colocación de capa de rodadura de asfalto con 25% y las capas de base y sub-base de material pétreo con 6% y 7% respectivamente, esto debido al consumo de combustible diésel de la maquinaria y equipo involucrado en la extracción, preparación, transporte y colocación.

Para la categoría de calentamiento global se determinó que los mayores contribuyentes al impacto son: relleno con material pétreo con 53%, colocación de capa de rodadura de asfalto con 24%, las capas de base y sub-base de material pétreo con 5% y 6%, hormigón para drenajes 4%, debido a las emisiones de gases generados por las operaciones de maquinaria pesada: volquetas, generador y caldero dentro de la planta de asfalto, de equipo caminero para los trabajos en la construcción de la vía. Para el caso del hormigón, se tiene que las emisiones se deben, principalmente, por el proceso de clinkerización para la producción de cemento. En la categoría de agotamiento de la capa de ozono, la actividad de relleno con material pétreo prevalece con 39%, la colocación de la capa de rodadura de asfalto 26% y el asfalto de imprimación 23%, producto de los gases de combustión en la fabricación de los constituyentes de las mezclas asfálticas y maquinaria de transporte y movimiento de material pétreo.

En el impacto de oxidación fotoquímica predominan las actividades relacionadas al movimiento de tierra (65%), en la que el relleno con material pétreo tiene 48%, colocación de la capa de rodadura e imprimación con 23% y 7% respectivamente, esto por la presencia de compuestos orgánicos volátiles en el asfalto y por el combustible utilizado en las operaciones de la maquinaria y equipos caminero.

4.1.2. Pavimento de hormigón hidráulico.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos para la etapa de construcción, por km, del sistema de pavimento hidráulico para 20 años, en las que se consideró lo mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 4. 2 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico para 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	Total
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.55
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	7613604
Calentamiento Global	kg CO2 eq	3145403
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.34
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	509
Acidificación	kg SO2 eq	13578
Eutrofización	kg PO4--- eq	3768

Para la categoría de agotamiento abiótico se tiene que casi toda la contribución a este impacto está dado por el hormigón que se usará, tanto para la capa de rodadura y las obras de drenaje, esto se debe principalmente al agregado grueso y fino que se usa para la preparación del hormigón, sumado al uso de caliza y otros correctivos minerales para la fabricación de cemento.

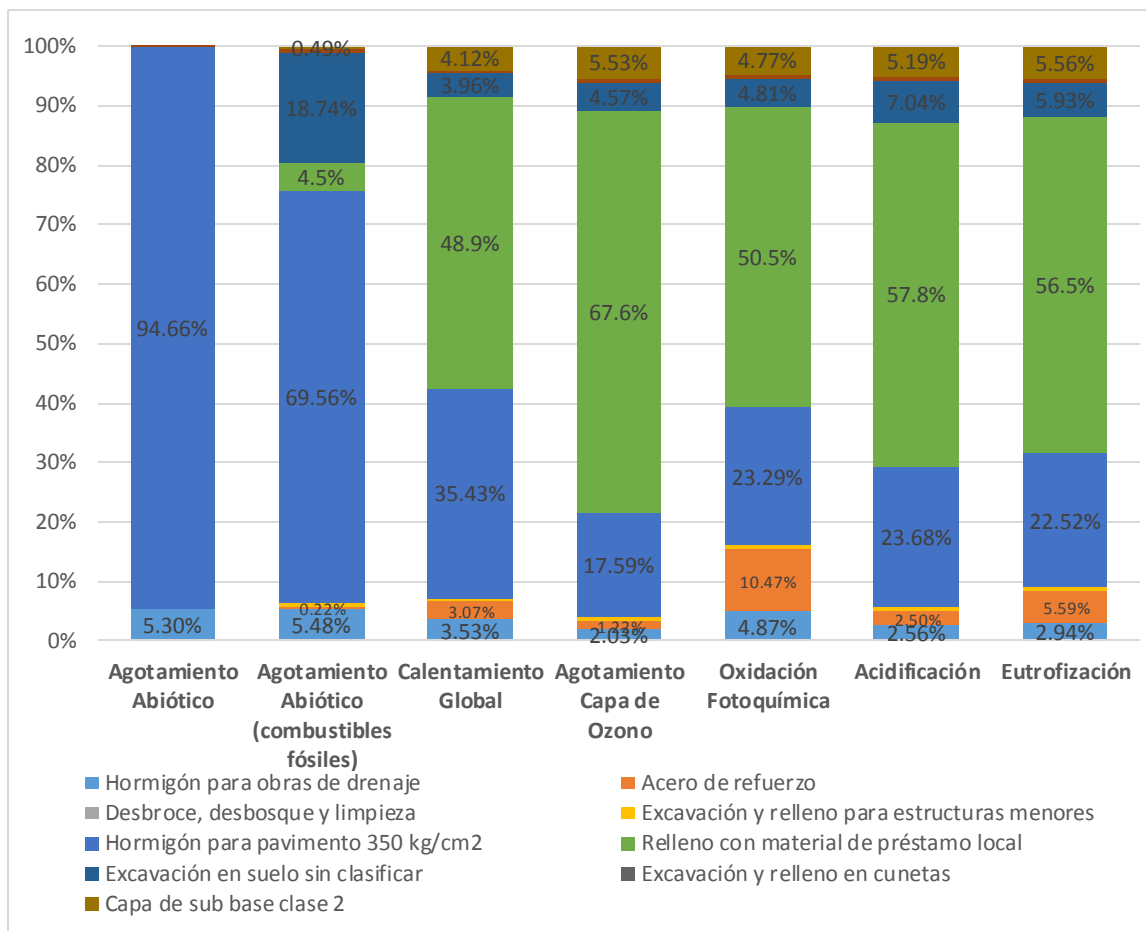


Fig. 4. 2 Análisis de contribución de los procesos y materiales a las categorías de impacto, para la etapa de construcción de 1 km de un pavimento de hormigón hidráulico para 20 años.

El potencial de Agotamiento Abiótico por consumo de combustible se encuentra en un 75% influenciado por el hormigón hidráulico que se usará, tanto para las obras complementarias y la capa de rodadura, este último con un 70%, debido a la cantidad que se empleará, la razón por la que el hormigón incide en mayor proporción es por el empleo de cemento Portland y la demanda de combustible que se emplea para su fabricación. Para la categoría de Potencial de Acidificación, la mayor contribución la realiza la actividad de relleno con material de préstamo local con 58%; esto debido al consumo de combustible en la operación de equipo caminero que se emplea. Le sigue el uso de hormigón, específicamente el que tiene una resistencia de 350 kg/cm², que es el que se usará para la capa de rodadura del pavimento, con 24%, esto se debe al empleo de cemento y sus emisiones de óxidos de azufre asociadas

a su fabricación. El uso de acero para refuerzo contribuye con 2% del total, esto debido a las emisiones de SO₂ presentes durante su fabricación. En el análisis para el Potencial de Eutrofización se observa que la actividad de relleno con material de préstamo local incide en 57% y las estructuras de hormigón aportan con 25% del total, esto por las emisiones de NO_x por el consumo de combustibles fósiles en el equipo caminero y en la fabricación de cemento. El uso de acero para refuerzo contribuye con 6% del total, esto debido a las emisiones de óxidos de nitrógeno presentes durante su fabricación. En la categoría de Potencial de Calentamiento Global, al igual que en acidificación y Eutrofización, la actividad de relleno con material de préstamo local es el proceso que más contribuye, con 49%, esto debido a las emisiones del combustible consumido y la cantidad de equipo caminero utilizado, seguido del uso de hormigón con 37%, que por la naturaleza de fabricación de cemento, involucra liberación de CO₂, desde la extracción de la piedra caliza y el consumo de combustible. El uso de acero para refuerzo contribuye con 3% del total, esto debido a las emisiones de CO₂ y CH₄ presentes durante su fabricación. Para la categoría de Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono la mayor contribución la aportan las actividades de movimiento de tierra, para la construcción de 1 km de pavimento de hormigón rígido, representan un 78%, siendo la actividad de relleno de material de préstamo local la que, dentro de esta categoría, ocupa una gran proporción con 68% del total, producto de los gases de combustión de maquinaria de transporte y movimiento de material pétreo y cemento empleado en hormigón. Para la categoría de Potencial de Oxidación Fotoquímica se determinó que las actividades de movimiento de tierra representan un 61%, siendo la actividad de relleno de material de préstamo local la que, dentro de esta categoría, ocupa una gran proporción con 50% del total, esto debido al transporte del material que se usará de relleno movimiento de equipo caminero. Lo que respecta al hormigón, afecta la fabricación del cemento y su transporte desde la planta de producción hasta la planta de concreto, razón

por la que contribuye con 28% del total, y de éste, el hormigón para la capa de rodadura representa el 23%. El uso de acero para refuerzo contribuye con 10% del total, esto debido a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles presentes durante su fabricación.

4.1.3 Comparación de resultados de construcción de la estructura de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.

La tabla 4.3 compara los resultados de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico antes de ser puestas en servicio. La Fig 4.3 ilustra la relación proporcional entre los aspectos ambientales para cada tipo de pavimento.

Tabla 4.3 Comparación de resultados de la caracterización para la etapa de construcción de 1 km de una estructura de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	Hidráulico	Asfáltico
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.55	0.03
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	7613604	3520666
Calentamiento Global	kg CO2 eq	3145403	2911770
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.34	0.59
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	509	533
Acidificación	kg SO2 eq	13578	15240
Eutrofización	kg PO4--- eq	3768	4104

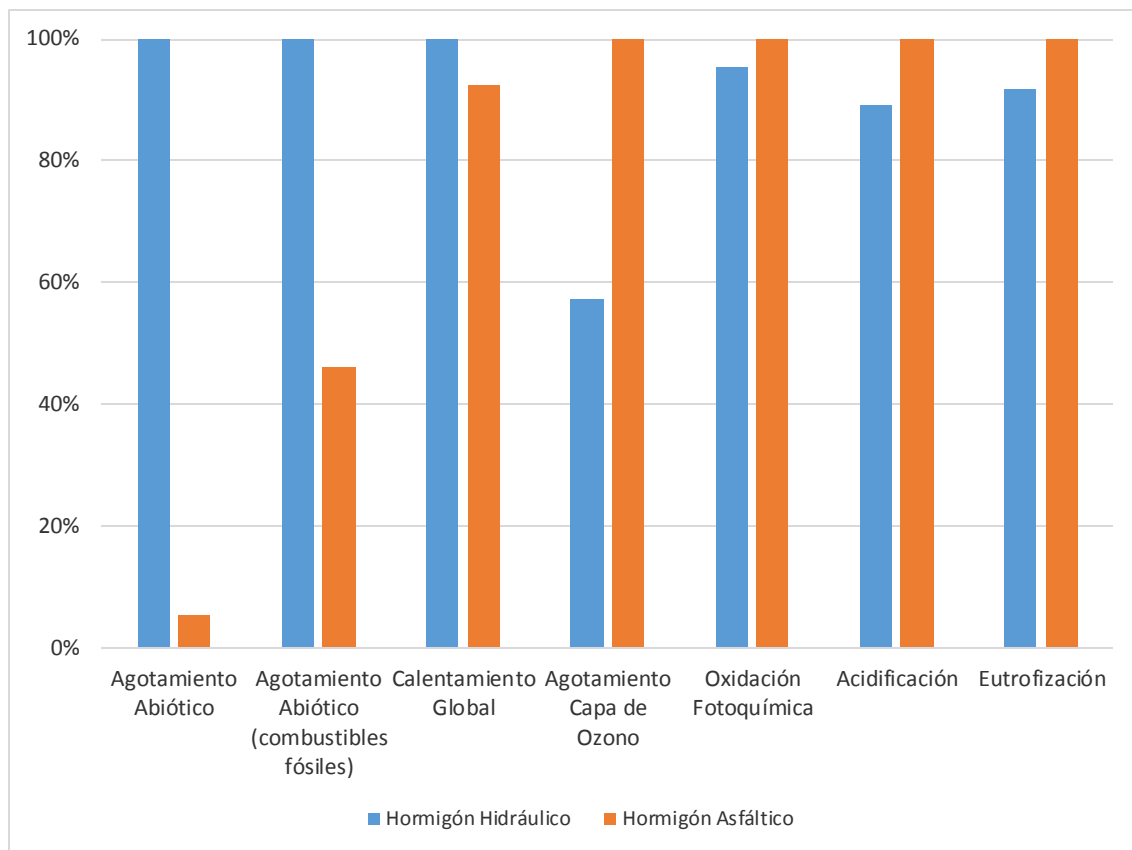


Fig. 4. 3 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la etapa de construcción de la estructuras de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.

4.2 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de mantenimiento.

4.2.1 Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de mantenimiento para una estructura de hormigón asfáltico.

La tabla 4.4 muestra los resultados, considerando los mantenimientos que se realizarán durante los 20 años que funcionará la vía, para mantener la serviciabilidad de la capa de rodadura, la cual se levantará y se repondrá por 3 ocasiones según lo analizado en la Fig. 3.4, en la que indica que la vía necesitará mantenimiento cada 6.6 años, sin que se realice actividades de mantenimiento para las capas de base y sub-base, ya que estos no se ven afectados durante su uso.

Tabla 4. 4 Resultados de la caracterización para la etapa de construcción y mantenimiento de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	t = inicial	t = 6.6 años	t = 12.6 años	t = 18.6 años
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.03	0.03	0.03	0.03
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	3520666	4786701	6052735	7318769
Calentamiento Global	kg CO2 eq	2911770	3713106	4514441	5315777
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.59	0.88	1.17	1.46
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	533	696	859	1023
Acidificación	kg SO2 eq	15240	19500	23760	28021
Eutrofización	kg PO4--- eq	4104	5211	6317	7423

En la Fig. 4.4 se presenta la contribución de los procesos de construcción y aplicación de tres recapeos, en los que se observa que este último tiene casi igual contribución que los procesos de la construcción inicial de la estructura de carretera con pavimento de hormigón asfáltico ya que, como se observó en las anteriores gráficas, los procesos que involucra el uso de asfalto están cerca del 30% de contribución en los impactos, lo que se muestra en la Fig. 4.5, en donde se muestra una relación aproximada de 1 a 1.

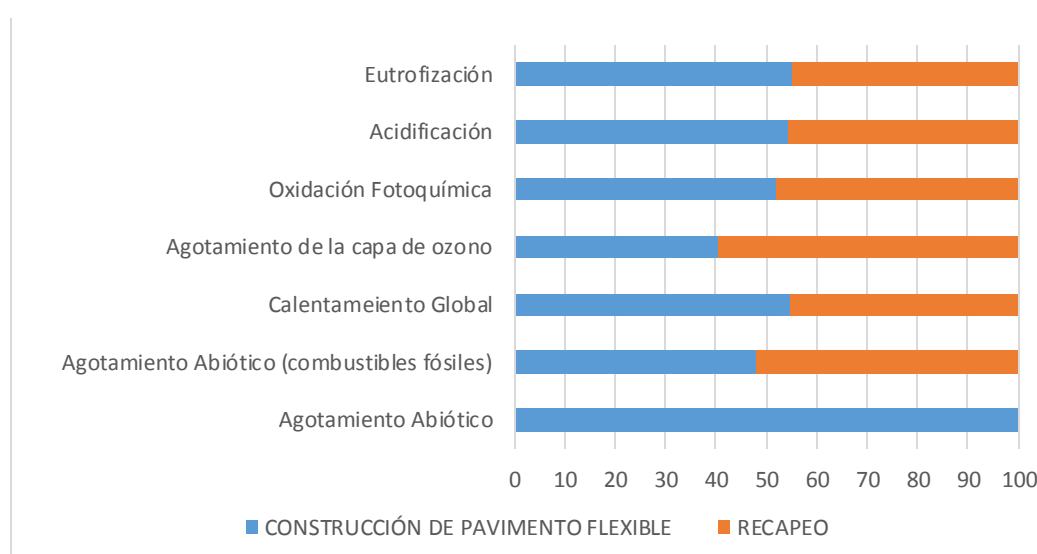


Fig. 4. 4 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la etapa de construcción de la estructuras de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años.

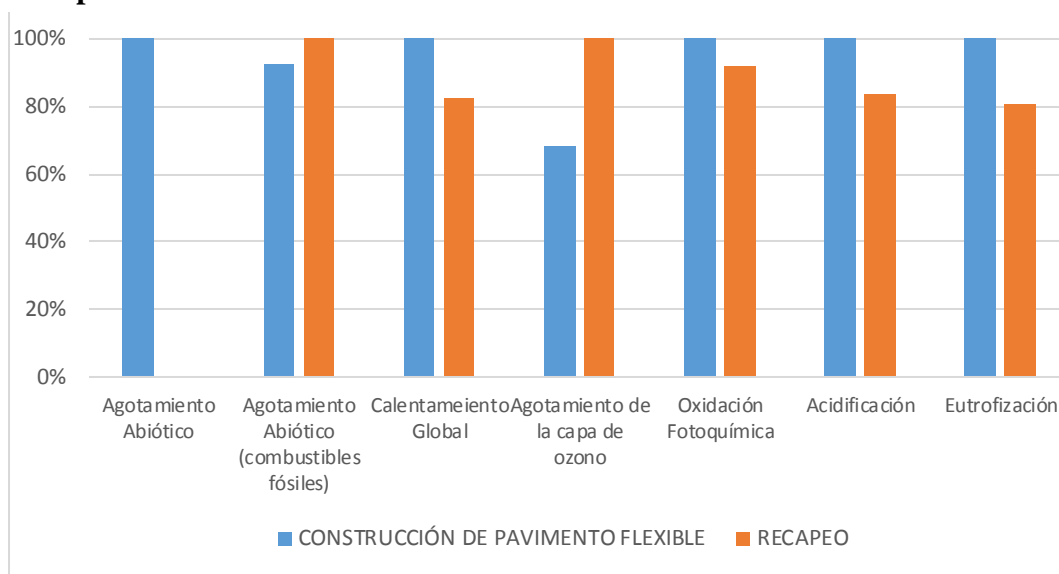


Fig. 4. 5 Relación proporcional entre resultados de los impactos ambientales de los procesos de construcción y mantenimiento (reapeo) de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

La Fig. 4.6 muestra el análisis de la contribución de los procesos involucrados para el mantenimiento por reapeo de la estructura de pavimento de hormigón asfáltico, la cual se realizará por tres ocasiones de acuerdo a la tabla 4.2. La colocación de la capa de rodadura aporta con el mayor porcentaje en las diferentes categorías de impacto, en el punto 4.1 fueron detalladas las causas que influyen en cada categoría.

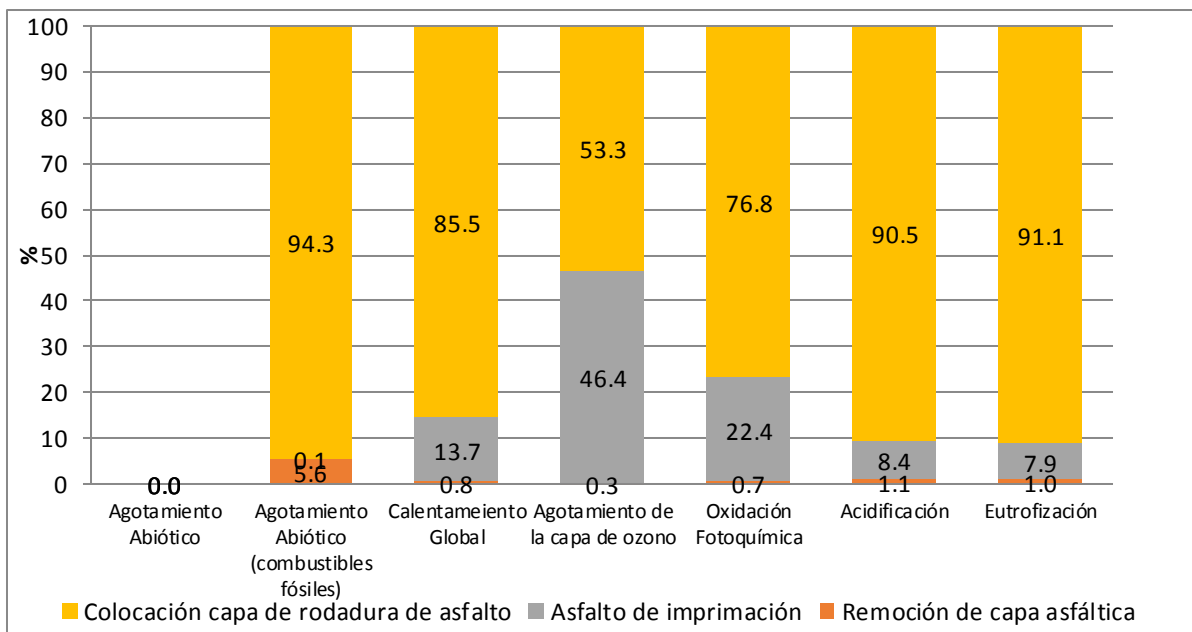


Fig. 4. 6 Análisis de contribución de los procesos y materiales a las categorías de impacto, de la etapa de mantenimiento de 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico para 20 años.

La tabla 4.5 compara los resultados de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico luego de 20 años en que, por temas de serviciabilidad, requirió que se realicen tres trabajos de mantenimiento. La Fig. 4.7 ilustra la relación proporcional, con respecto al de mayor magnitud, entre los aspectos ambientales para cada tipo de pavimento, considerando las tres actividades de recapeo.

Tabla 4. 5 Comparación de resultados de la caracterización para la etapa de construcción de una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico con su mantenimiento (recapeo cada 6.6 años) por 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	Hidráulico	Asfáltico
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.55	0.03
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	7613604	7318769.43
Calentamiento Global	kg CO2 eq	3145403	5315776.96

Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.34	1.46
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	509	1022.57
Acidificación	kg SO2 eq	13578	28020.52
Eutrofización	kg PO4--- eq	3768	7423.43

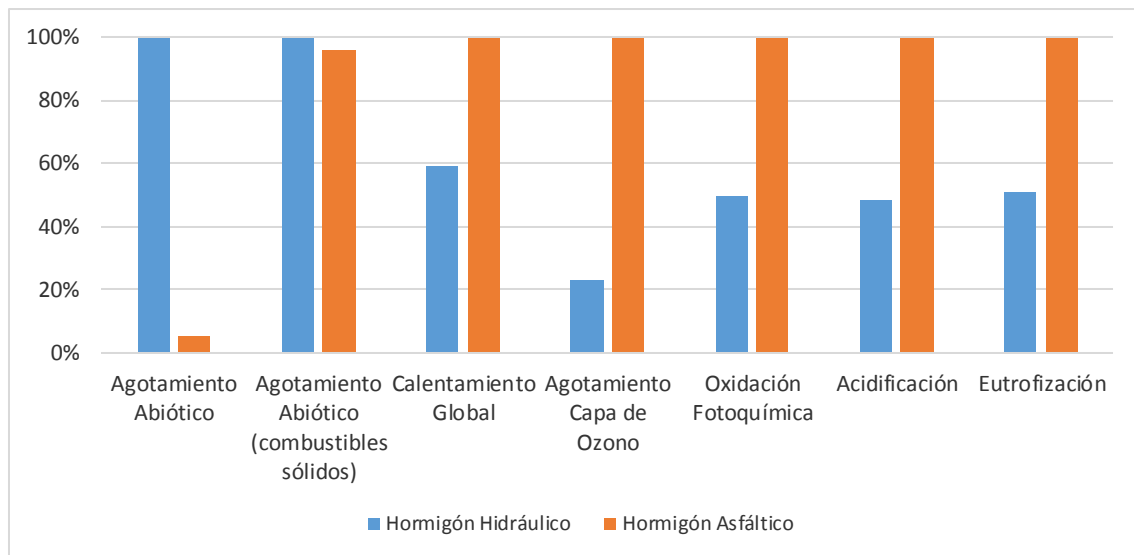


Fig. 4. 7 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la construcción de 1 km de estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico con su mantenimiento (recapeo cada 6.6 años) por 20 años.

4.3. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la etapa de uso.

4.3.1. Análisis y comparación de los resultados de caracterización del efecto albedo y de carbonatación.

La tabla 4.6 muestra los valores obtenidos para el efecto albedo, para una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico para 20 años, en la que se observa que la capa de hormigón hidráulico mitiga el efecto de calentamiento global, debido a que genera reflejo por su mayor albedo, al contrario que el hormigón asfáltico, que contribuye al efecto de calentamiento global al tener menor albedo que el terreno original. La tabla 4.7 muestra el resultado de la carbonatación (atrapamiento de CO₂), lo cual contribuye con la mitigación del calentamiento global.

Tabla 4. 6 Efecto Albedo de una estructura de 1 km de pavimento por 20 años, para hormigón asfáltico e hidráulico.

	Efecto Albedo	
	Hormigón Asfáltico	Hormigón Hidráulico
kg CO2 eq	179613	-718454

Tabla 4. 7 Absorción de CO2 por carbonatación de una estructura de 1 km de pavimento por 20 años, para hormigón asfáltico e hidráulico.

	Carbonatación	
	Hormigón Asfáltico	Hormigón Hidráulico
kg CO2 eq	No Aplica	79184

4.3.2. Análisis y comparación de los resultados de caracterización de los efectos asociados al consumo de combustible.

El impacto del consumo de combustible por los vehículos que circularán por la carretera durante 20 años se muestra en la tabla 4.8, además de las emisiones de CO2 y la energía asociada al combustible. El mayor consumo se presenta en el hormigón asfáltico, debido a la influencia de la variación en la rugosidad de su capa de rodadura (IRI).

Tabla 4. 8 Impacto del consumo de combustible por los vehículos que circularán por la estructura de pavimento durante 20 años.

	Asfáltico	Hidráulico
Consumo, l/km	30527428	30506897
Emisión, kg CO2/km	75307	75255
Energía, MJ	1112788452	1112012410

4.4. Análisis y comparación de los resultados de caracterización durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.

4.4.1. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la categoría de Calentamiento Global durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.

La tabla 4.9 y la Fig. 4.8 comparan los diferentes escenarios que afectan al Potencial de Calentamiento Global, expresados en términos de kg de CO₂, para una estructura de 1 km de pavimento hormigón asfáltico e hidráulico por 20 años, en la que se observa que la actividad de reapeo por mantenimiento influye en poco menos del 50% del total del impacto para el hormigón asfáltico.

Tabla 4.9 kg de CO₂ emitido por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.

	Hormigón Hidráulico	Hormigón Asfáltico
Construcción	3145403	2911770
Mantenimiento	No Aplica	2404007
Albedo	-718454	179613
Carbonatación	-79184	No Aplica
Consumo combustible	75255	75307

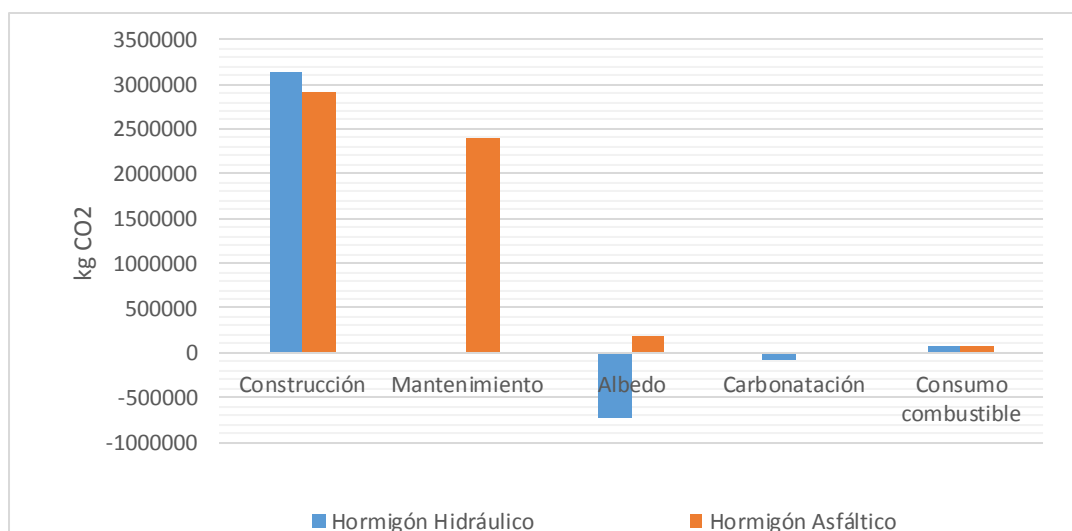


Fig. 4. 8 kg de CO2 emitido por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.

La Fig. 4.9 muestra la contribución de cada una de las actividades para la categoría de Potencial de Calentamiento Global para una estructura de pavimento de 1 km de pavimento de hormigón asfáltico para 20 años, en el que se observa que las actividades relacionadas a la construcción y mantenimiento tienen una contribución en conjunto del 95%, las actividades relacionadas a la etapa de uso sólo aporta con el 5% de las emisiones de CO2. Esto debido a las altas emisiones de gases de efecto invernadero durante la ejecución de las actividades relacionadas al uso y aplicación del hormigón asfáltico.

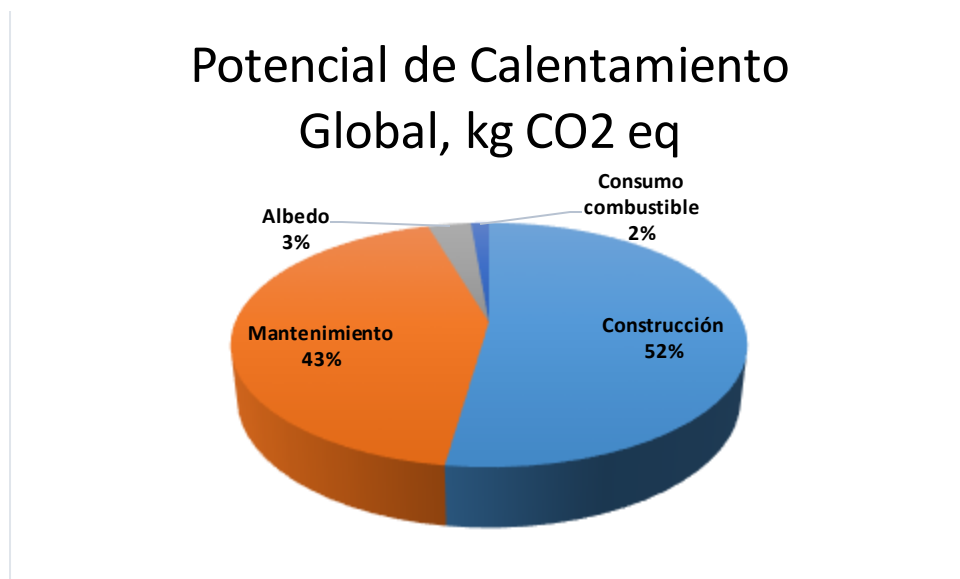


Fig. 4.9 Potencial de Calentamiento Global: Análisis de contribución de las actividades durante 20 años para 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico.

4.4.2. Análisis y comparación de los resultados de caracterización para la categoría de Agotamiento Abiótico por Consumo de Combustible durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.

La tabla 4.10 muestra los resultados obtenidos en términos de agotamiento abiótico por consumo de combustible de los vehículos que transitarán por la vía durante 20 años, se observa que el consumo de combustible por parte de los vehículos que transitarán por la vía, es mucho mayor a lo observado para la construcción de la estructura.

Tabla 4. 10 Agotamiento Abiótico por consumo de combustible, en MJ, por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.

	Hormigón Hidráulico	Hormigón Asfáltico
Construcción	7613604	3520666
Mantenimiento	No Aplica	3798103
Consumo combustible	1112012410	1112788452

En la Fig. 4.10 se observa que la demanda energética por consumo de combustible de la estructura de pavimento de hormigón asfáltico es mayor que en el pavimento de hormigón hidráulico, debido al mayor consumo de combustible, producto de la mayor variación de la rugosidad de la capa de rodadura (IRI).



Fig. 4. 10 Agotamiento biótico por consumo de combustible, en MJ, por las actividades asociadas a una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico durante 20 años.

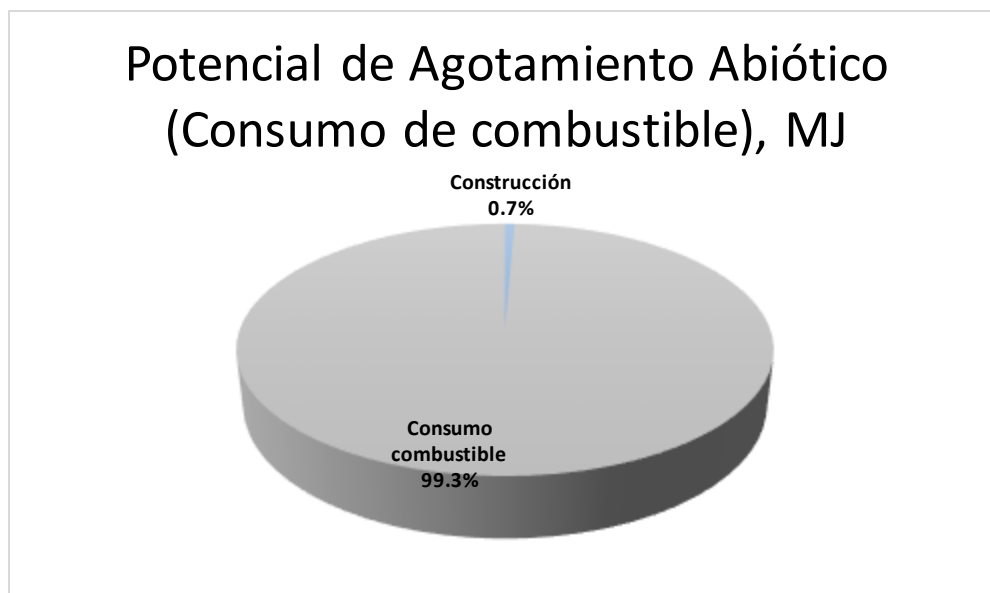


Fig. 4. 11 Potencial de Agotamiento Abiótico por consumo de combustibles fósiles (MJ): Análisis de contribución de los procesos y etapas para 1 km de un pavimento de hormigón hidráulico por 20 años.

La Fig 4.11 muestra la contribución de las diferentes actividades en el consumo de energía involucradas durante 20 años en la estructura de 1 km de hormigón hidráulico, en la que la energía asociada al consumo de combustible por los vehículos que circularán por dicha vía durante 20 años incide en el 99% de la demanda energética, siendo muy superior a la energía utilizada para su construcción.

La Fig 4.12 muestra la contribución de las diferentes actividades en el consumo de energía involucradas durante 20 años en la estructura de 1 km de hormigón asfáltico, en la que la energía asociada al consumo de combustible por los vehículos que circularán por dicha vía durante 20 años incide en el 99% de la demanda energética, siendo muy superior a la energía utilizada para su construcción y las tres aplicaciones de recapeo para mantener la serviciabilidad de capa de rodadura.

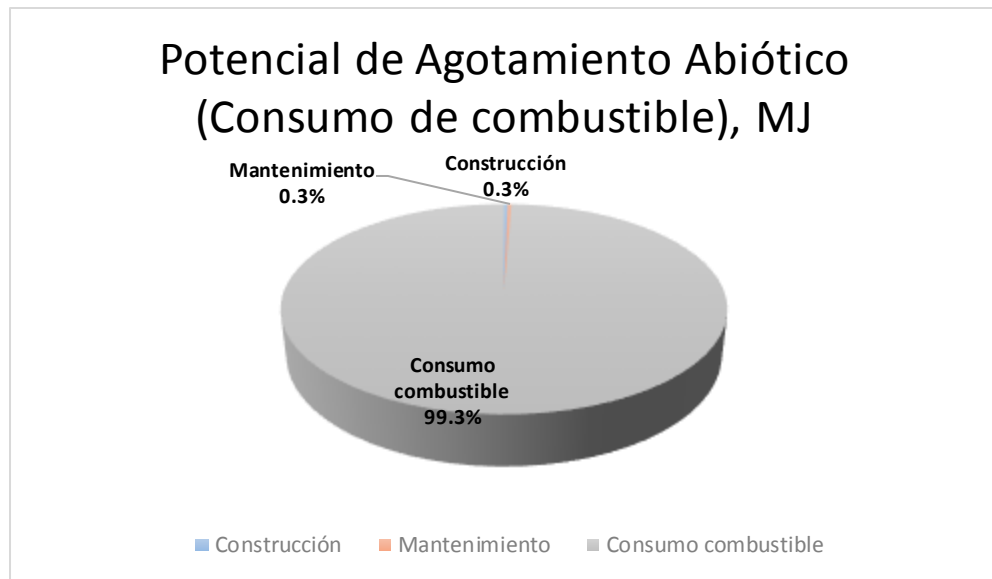


Fig. 4. 12 Potencial de Agotamiento Abiótico por consumo de combustibles fósiles (MJ): Análisis de contribución de los procesos y etapas para 1 km de un pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

4.4.3. Análisis y comparación de los resultados de caracterización de los impactos durante la vida útil de las estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico.

La tabla 4.11 muestra los resultados de las diferentes categorías de impactos en los que se incluyen las actividades consideradas para la etapa de uso y mantenimientos de la capa de rodadura del pavimento de hormigón asfáltico, se observa un incremento en el agotamiento abiótico por consumo de combustibles fósiles, debido al combustible utilizado por los vehículos que circularán por la carretera durante 20 años. Se observa que la estructura de pavimento de hormigón asfáltico supera en todos las categorías de impacto a la de hormigón rígido, excepto en la categoría de Agotamiento Abiótico, esto debido a las características de fabricación del material cementante para el hormigón hidráulico.

Tabla 4. 11 Comparación de resultados de la caracterización para una estructura de 1 km de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico por 20 años.

Categoría de Impacto	Unidad	Hormigón Hidráulico	Hormigón Asfáltico
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq	0.55	0.03
Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)	MJ	1119632014	1120107221
Calentamiento Global	kg CO2 eq	2423020	5570697
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	0.34	1.46
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq	509	1023
Acidificación	kg SO2 eq	13578	28021
Eutrofización	kg PO4--- eq	3768	7423

La Fig. 4.13 muestra la relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la vida útil de 1 km de estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico por 20 años, en el que se observa que los valores obtenidos para el hormigón asfáltico, al menos, duplican los valores obtenidos para un pavimento de hormigón asfáltico, excepto en el potencial de agotamiento abiótico por consumo de combustibles fósiles, en el que son casi similares y en el de agotamiento abiótico, en el que, por la naturaleza de fabricación de cemento, demanda de gran cantidad de caliza y otros correctivos minerales.

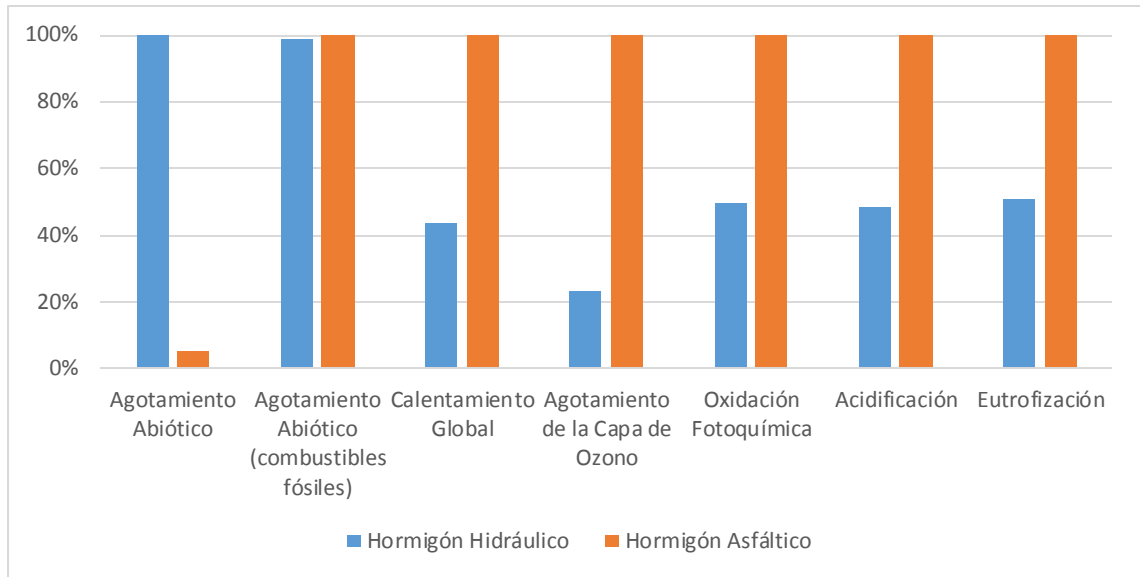


Fig. 4. 13 Relación proporcional entre resultados de impactos ambientales de la vida útil de 1 km de estructuras de pavimento de hormigón hidráulico y asfáltico por 20 años.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este trabajo fueron obtenidos en base a la información contenida en las bases de datos disponibles en el programa utilizado y bibliografía consultada, por lo que no deben ser considerados como valores absolutos. Las técnicas constructivas, políticas de mantenimiento vial, niveles de tráfico proyectado, regulaciones ambientales para maquinaria y vehículos de diferentes países, investigaciones locales y las condiciones geográficas inciden en los resultados finales. Dentro de las factores que influirían en la obtención de los resultados, se tiene la utilización materiales vírgenes para la construcción de capa de rodadura de hormigón flexible o reciclar el hormigón asfáltico que se obtiene al retirar la capa de rodadura en las tareas de mantenimiento para mantener la serviciabilidad de la vía, este procedimiento constructivo permite la reducción en la utilización del ligante asfáltico y los requerimientos de material pétreo (Giani, Dotelli, Brandini, & Zampori, 2015). La etapa de fin de uso puede incluir demolición, disposición final en relleno de sanitario o reciclaje como agregado para ser usado para la fabricación del hormigón para la capa de rodadura (Santero, Masanet, & Horvath, 2010), que es lo que se aplicó en esta evaluación para la rehabilitación del hormigón asfáltico, debido a que la losa de hormigón hidráulica permanecerá en el pavimento después de los 20 años de servicio. Estudios previos han demostrado que al reciclar el 40% del hormigón hidráulico sólo se tiene una mitigación del 5% de impactos ambientales, al contrario que para el hormigón asfáltico, con el que se logra una mitigación del 12% de los impactos al realizar un reemplazo del 20% con asfalto reciclado (Blankendaal, Schuur, & Voordijk, 2014), y en trabajos en que se ha utilizado el 85% de material reciclados, la emisiones de gases de efecto invernadero tienen una reducción de 35% (Turk, Mauko Pranjić, Mladenovič, Cotič, & Jurjavčič, 2016). Inyim, et

al, 2016 realizó una revisión de investigaciones disponibles para la Evaluación de Ciclo de Vida de pavimentos e identificó limitaciones que dificultan su evaluación, entre éstas se tiene las relacionadas a sus fases: Mantenimiento y Reparación, Uso y Fin de Vida y sólo el 50% de los estudios revisados incluían a estas tres fases (Inyim, Pereyra, Bienvenu, & Mostafavi, 2016). La disponibilidad de información es otra limitante para la obtención de resultados, en el caso de esta investigación, la determinación de emisiones se realizó sólo con CO₂, debido a la falta de información de las otras emisiones.

5.1. Conclusiones

1. El mayor nivel de impacto se da en la categoría de Agotamiento de Recursos Abióticos de Combustibles y se da en la etapa de uso, debido al uso de combustible en los vehículos que circularán por la vía durante los 20 años para lo cual fue diseñada la vía. En este caso, el impacto causado por el pavimento de hormigón asfáltico fue superior. Este valor representa el 99% del total del impacto de lo obtenido en los dos tipos de pavimentos.
2. En la etapa de construcción, antes de los trabajos de mantenimiento, la estructura de pavimento de hormigón hidráulico tuvo el menor desempeño ambiental en la categoría de Agotamiento de Recursos Abióticos de Combustibles, el resultado en este impacto es aproximadamente el doble que el obtenido en un pavimento de hormigón asfáltico. Dentro de la etapa constructiva, el uso de hormigón representa el 75% de este impacto, siendo el hormigón que se usará para la capa de rodadura el que represente el 70%, debido a la cantidad que se usa y el mayor contenido de cemento que los otros tipos de hormigón.
3. Luego de realizar las actividades de mantenimiento del pavimento de hormigón asfáltico, el impacto generado en la categoría de Agotamiento de Recursos Abióticos de Combustibles es aproximadamente 4% inferior al ocasionado por la construcción del pavimento de

hormigón hidráulico. El impacto de las actividades de mantenimiento, relacionadas al manejo y colocación de asfalto, superan en aproximadamente 8% al valor total obtenido para la etapa constructiva. Durante la etapa de construcción, la actividad de colocación de capa de rodadura de hormigón asfáltico contribuye con el 34% del total de esta etapa.

4. La actividad de relleno con material de préstamo local, es la que mayor impacto negativo tiene en todas las categorías evaluadas en la etapa de construcción, excepto en las categorías de Potencial de Agotamiento Abiótico, con rangos de aportación de 34% a 53% para la estructura de pavimento de hormigón asfáltico y de 49% a 68% para la estructura de pavimento de hormigón hidráulico.

5. El mayor nivel de impacto en la categoría de Potencia de Calentamiento Global se da en la etapa de construcción, esto se obtuvo para los dos sistemas de estructuras de pavimentos analizados. Al final de los 20 años de utilización de la vía, se obtiene que el impacto de la estructura de hormigón asfáltico es mayor que el impacto causado por la estructura de hormigón hidráulico, en una proporción aproximada de dos a uno.

6. En la etapa de construcción, antes de los trabajos de mantenimiento, la estructura de pavimento de hormigón hidráulico tuvo el menor desempeño ambiental en la categoría de Potencial de Calentamiento Global que la estructura de pavimento de hormigón asfáltico, en aproximadamente 10%. Dentro de la etapa constructiva, el uso de hormigón representa el 40% de este impacto, siendo el hormigón que se usará para la capa de rodadura el que represente el 35%, esto es por las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de cemento.

7. En la etapa de uso, la estructura de pavimento de hormigón hidráulico presenta ventajas con respecto a la de hormigón asfáltico, la mitigación de CO₂ debido a los efectos albedo y de carbonatación representan una disminución del 25% del impacto ocasionado por su construcción.

8. Las actividades de mantenimiento de recapeo, para mantener la serviciabilidad del pavimento de hormigón asfáltico, contribuye con aproximadamente el 80% del total del impacto debido a la construcción de la estructura, con lo que se obtiene una afectación negativa para la categoría de Calentamiento Global.

9. La variación de la superficie del terreno, debido a la aplicación de hormigón asfáltico sobre el terreno original, ocasiona una disminución en el albedo, lo cual provoca una contribución del 3% en la categoría de Calentamiento Global.

10. El pavimento de hormigón hidráulico tiene mayor impacto en la categoría de agotamiento abiótico que el hormigón asfáltico, en aproximadamente una proporción de veinte a uno, esto debido al uso cemento y la cantidad de materias primas que se deben extraer de la corteza terrestre para su elaboración.

11. El pavimento de hormigón asfáltico tiene mayor impacto en la categoría de agotamiento de capa de ozono que el hormigón hidráulico, en aproximadamente una proporción de cinco a uno. Las actividades relacionadas a la colocación del hormigón asfáltico, en la etapa de construcción, equivalen al 50% del total del impacto. En las actividades de mantenimiento, las actividades relacionadas a la colocación del hormigón asfáltico equivalen al 99.7%, esta contribución se debe a las emisiones asociadas a la producción de las mezclas asfálticas.

12. En general, los impactos generados por la estructura de pavimento de hormigón asfáltico superan a los generados por la estructura de pavimento de hormigón hidráulico en aproximadamente 45% al final de 20 años.

5.2. Recomendaciones

1. Debido a que diferentes condiciones que se presenten en la vía (orografía, clima, composición de tráfico, etc.) influyen en la forma de conducir y éste en el consumo de combustible, es necesario evaluar el desempeño ambiental que tendría un pavimento de hormigón asfáltico versus uno de hormigón hidráulico en diferentes condiciones climatológicas, orográficas, etc.

2. Medir y recopilar información del consumo de combustible y sus emisiones para los diferentes tipos y antigüedad de vehículos bajo las diferentes condiciones, las cuales permitirán evaluar de mejor manera los impactos en nuestro país.

3. Evaluar el desempeño ambiental de diferentes estructuras de pavimentos en períodos mayores a 20 años, para estimar el impacto total que tendría el eventual levantamiento de la capa de hormigón hidráulico con la reposición con una nueva capa y mayor cantidad de rehabilitación de capas de hormigón asfáltico.

4. Desarrollar técnicas que permitan fabricar cemento con menor emisión a las que se tiene actualmente, con uso de combustibles alternativos, en reemplazo de los fósiles tradicionales, que permitan disminuir la carga ambiental.

6. Referencias

- Anastasiou, E. K., Liapis, A., & Papayianni, I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, *101*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>
- Anthonissen, J., Braet, J., & Van den bergh, W. (2015). Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *41*, 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.011>
- 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>
- Azarijafari, H., Yahia, A., & Ben Amor, M. (2016). Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2187–2197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>
- Balbo, J. T. (2009). *Pavimentos de Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Retrieved from http://www.imcyc.com/50/pdfs/50a_PavimentosChih.pdf
- Banco del Estado. (2013). *Macro Programa “Construyendo Caminos”* (p. 21). p. 21. Retrieved from <http://www.bde.fin.ec/sites/default/files/u137/BDE/PDF/2015/03Marzo/ConstruyendoCaminosDiseno.pdf>
- Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., & Zampori, L. (2020). Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA: Status, key challenges and potential way forward. *Resources, Conservation and Recycling*, *157*(February), 104748. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104748>
- Blankendaal, T., Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. *Journal of Cleaner Production*, *66*, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>
- Butt, A. A., Toller, S., & Birgisson, B. (2015). Life cycle assessment for the green procurement of roads: A way forward. *Journal of Cleaner Production*, *90*, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.068>
- Cao, R., Leng, Z., Yu, H., & Hsu, S. C. (2019). Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, *147*(April), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.031>
- Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2015). Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *34*, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.001>
- Chen, W., Hong, J., & Xu, C. (2015). Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. *Journal of Cleaner Production*, *103*, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.048>
- Cui, H., Tang, W., Liu, W., Dong, Z., & Xing, F. (2015). Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*, *93*, 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>

- Estokova, A., Vilcekova, S., & Porhincak, M. (2017). Analyzing Embodied Energy, Global Warming and Acidification Potentials of Materials in Residential Buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.330>
- Farinango, D. (2014). Análisis comparativo de costos entre el pavimento rígido y pavimento flexible. Universidad Central Del Ecuador.
- Galatioto, F., Huang, Y., Parry, T., Bird, R., & Bell, M. (2015). Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.007>
- García-Gusano, D., Herrera, I., Garraín, D., Lechón, Y., & Cabal, H. (2014). Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental -friendly solutions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0757-0>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in -place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- H. Baumann y A.-M. Tillman, (2004). The Hitch Hiker’s Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application. Professional Pub Serv.
- Herrera, R., Botasso, G., Cachago, A., Cajo, E., & Palma, L. (2006). Caracterización de los asfaltos utilizados en las obras viales del Ecuador. *Línea*. Available: [Http://Lemac.Frlp.Utn.Edu.Ar/Wpcontent/Uploads/2011/12/2006_Caracterizacion-Asfaltos-Obras-Viales-Del-Ecuador_II-Simposio-Iberoamericano-y-Ecuatoriano-Ing-de-Pavim.Pdf](http://Lemac.Frlp.Utn.Edu.Ar/Wpcontent/Uploads/2011/12/2006_Caracterizacion-Asfaltos-Obras-Viales-Del-Ecuador_II-Simposio-Iberoamericano-y-Ecuatoriano-Ing-de-Pavim.Pdf). [Último Acceso: 14 Abril 2016], 13.
- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>
- Inti, S., Sharma, M., & Tandon, V. (2016). An Approach for Performing Life Cycle Impact Assessment of Pavements for Evaluating Alternative Pavement Designs. *Procedia Engineering*, 145, 964–971. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.125>
- Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2016). Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 176, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>
- Iso. (2006). ISO 14040. Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Évaluation de l’impact du cycle de vie. *International Standard*, 2006, 24.
- Iso. (2000). ISO 14042. Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Évaluation de l’impact du cycle de vie. *International Standard*, 2000, 24.
- Iso. (2006). ISO 14044. Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Évaluation de l’impact du cycle de vie. *International Standard*, 2006, 24.
- Jullien, A., Dauvergne, M., & Cerezo, V. (2014). Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 29(2010), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006>

- Lara, rene rodriguez. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles que se consumen en México*. 52(5000), 1–62. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- Liu, X., Cui, Q., & Schwartz, C. (2014). Greenhouse gas emissions of alternative pavement designs: Framework development and illustrative application. *Journal of Environmental Management*, 132, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.016>
- Loijos, A., Santero, N., & Ochsendorf, J. (2013). Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.014>
- Miller, S. A., Monteiro, P. J. M., Ostertag, C. P., & Horvath, A. (2016). Comparison indices for design and proportioning of concrete mixtures taking environmental impacts into account. *Cement and Concrete Composites*, 68, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.002>
- MITECO, (2019). *Factores de emisión, Registro de huellas de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono*. 2020. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-479095.pdf
- MTOP. (2012). *Programa de conservación por nivel de servicio*. 2012, 40. Retrieved from <http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/CONSERVACION-NIVELES-DE-SERVICIO.pdf>
- Ramachandran, S., Bryan, H., White, P., & Reddy, T. A. (2013). *Life Cycle Assessment of Wall Systems by the Graduate Supervisor Committee*. (July).
- Rodríguez, P. del A. (1999). *Desarrollo de la ecuación de correlación para la determinación del IRI en pavimentos asfálticos nuevos utilizando el rugosímetro Merlín*. (2).
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2010). Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, (April), 81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- Schulze, R., Guinée, J., van Oers, L., Alvarenga, R., Dewulf, J., & Drielsma, J. (2020). Abiotic resource use in life cycle impact assessment —Part I- towards a common perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 154(February 2019), 104596. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104596>
- Sergio, V. C., Quintana, C., & Carlos, J. (n.d.). *Evaluación de las fuentes de emisiones contaminantes en plantas de mezclas de asfalto en caliente*. 1–17.
- Smith, S. H., & Durham, S. A. (2016). A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.01.001>
- Standard, I. (2000). Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle interpretation Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Interprétation du cycle de vie. *Reference Number ISO, 14043(14043)*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>

- Susca, T. (2012). Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution*, *163*, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.019>
- Turk, J., Mauko Pranjić, A., Mladenović, A., Cotič, Z., & Jurjavčič, P. (2016). Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, *121*, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.040>
- van Oers, L., de Koning, A., Guinée, J. B., & Huppés, G. (2002). Abiotic Resource Depletion in LCA: Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. *Road and Hydraulic Engineering Institute*, (June), 1–75. Retrieved from https://books.google.co.uk/books?id=uvYOnQEACAAJ%0Ahttps://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf
- van Oers, L., & Guinée, J. (2016). The abiotic depletion potential: Background, updates, and future. *Resources*, *5*(1). <https://doi.org/10.3390/resources5010016>
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, *74*, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>
- WRAP. (2010). *Life cycle assessment of example packaging systems for milk*. (June 2009), 125. Retrieved from [http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Final Report Doorstep 29 01 10 \(2\).pdf](http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Final%20Report%20Doorstep%2029%2001%2012.pdf)
- Wu, P., Xia, B., & Zhao, X. (2014). The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *37*, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.070>
- Xu, X., Akbarian, M., Gregory, J., & Kirchain, R. (2019). Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context. *Journal of Cleaner Production*, *230*, 1156–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.009>
- Yang, K. H., Seo, E. A., & Tae, S. H. (2014). Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, *46*, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.004>
- Yu, B. (2013). Environmental Implications of Pavements: A Life Cycle View. *Graduate Theses and Dissertations*, (January), 1–236.
- Yu, B., & Lu, Q. (2012). Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(5), 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>
- Yu, B., & Lu, Q. (2014). Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *64*, 306–309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.034>
- Yu, B., Lu, Q., & Xu, J. (2013). An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *55*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.07.004>
- Zhang, H., Keoleian, G. A., & Lepech, M. D. (2008). An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems. *Life-Cycle Civil Engineering - Proceedings*

of the 1st International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE'08, (Iso 1997), 907–912. <https://doi.org/10.1201/9780203885307.ch141>

7. Apéndices y anexos

Apéndice A

Tabla A.1

Factores de incremento Consumo de combustible y de consumo anual para una estructura de pavimento de hormigón hidráulico por 20 años.

Año(s) de servicio	IRI	Factor de consumo de combustible (FCC)		Consumo de combustible por vehículo		Vehículos /año			Consumo de combustible por año	
		Liviano	Pesado	Liviano gl/km	Pesado gl/km	LIVIANOS/ AÑO	PESADOS/ AÑO	TOTAL/AÑO	Liviano l/km año	Pesado l/km año
1	0.950	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	5934170	1372400	7306570	653914	531408
2	1.000	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	6249194	1428125	7677319	688628	552985
3	1.020	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	6412923	1456830	7869753	706670	564100
4	1.040	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	6580941	1486113	8067054	725185	575439
5	1.060	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	6753362	1515983	8269345	744185	587005
6	1.080	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	6930300	1546455	8476755	763683	598804
7	1.100	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	7111874	1577538	8689412	783691	610840
8	1.120	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	7298205	1609247	8907452	804224	623118
9	1.140	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	7489418	1641593	9131011	825295	635642
10	1.160	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	7685641	1674589	9360230	846917	648419
11	1.180	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	7887005	1708248	9595253	869106	661452
12	1.200	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	8093644	1742584	9836228	891877	674747
13	1.220	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	8305698	1777610	10083307	915244	688309
14	1.250	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	8523307	1813340	10336647	939224	702144
15	1.270	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	8746618	1849788	10596405	963831	716258

Año(s) de servicio	IRI	Factor de consumo de combustible (FCC)		Consumo de combustible por vehículo		Vehículos /año			Consumo de combustible por año	
		Liviano	Pesado	Liviano gl/km	Pesado gl/km	LIVIANOS/ AÑO	PESADOS/ AÑO	TOTAL/AÑO	Liviano l/km año	Pesado l/km año
16	1.300	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	8975779	1886969	10862748	989084	730654
17	1.325	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	9210944	1924897	11135841	1014998	745340
18	1.350	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	9452271	1963587	11415858	1041591	760322
19	1.375	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	9699921	2003055	11702976	1068880	775604
20	1.400	1.0000	1.000000	0.02911	0.10229028	9954059	2043317	11997375	1096885	791194
TOTAL DE VEHÍCULOS EN 20 AÑOS:						157295273	34022266	191317539	17333113	13173784

Tabla A.2
Estimación de emisiones de CO2 por consumo de combustible para una estructura de pavimento de hormigón hidráulico por 20 años.

Año(s) de servicio	Consumo de combustible por año		Emisiones de CO2	
	Liviano l/km año	Pesado l/km año	Liviano (gasolina)	Pesado (diésel)
1	653914	531408	2.32 g CO2/l	2.66 g CO2/l
2	688628	552985		
3	706670	564100		
4	725185	575439		
5	744185	587005		
6	763683	598804		
7	783691	610840		
8	804224	623118		
9	825295	635642		
10	846917	648419		
11	869106	661452		
12	891877	674747		
13	915244	688309		
14	939224	702144		
15	963831	716258		
16	989084	730654		
17	1014998	745340		
18	1041591	760322		
19	1068880	775604		
20	1096885	791194		
TOTAL EN 20 AÑOS:	17333113	13173784	40213 kg CO2/km	35042 kg CO2/km

Tabla A.3
Estimación de energía asociada por consumo de combustible para una estructura de pavimento de hormigón hidráulico por 20 años.

Año(s) de servicio	Consumo de combustible por año		Energía asociada al combustible	
	Liviano l/km año	Pesado l/km año	Liviano (gasolina)	Pesado (diésel)
1	653914	531408	34.78 MJ/l	38.65 MJ/l
2	688628	552985		
3	706670	564100		
4	725185	575439		
5	744185	587005		
6	763683	598804		
7	783691	610840		
8	804224	623118		
9	825295	635642		
10	846917	648419		
11	869106	661452		
12	891877	674747		
13	915244	688309		
14	939224	702144		
15	963831	716258		
16	989084	730654		
17	1014998	745340		
18	1041591	760322		
19	1068880	775604		
20	1096885	791194		
TOTAL EN 20 AÑOS:	17333113	13173784	602845672 MJ	509166738 MJ

Tabla A.4

Factores de incremento Consumo de combustible y de consumo anual para una estructura de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

Año(s) de servicio	IRI	IRI f(PSI)	Factor de consumo de combustible (FCC)		Consumo de combustible por vehículo		Vehículos /año		Consumo de combustible por año	
			Liviano	Pesado			Vehículos livianos	Vehículos pesados	Liviano	Pesado
					gl/km	gl/km			l/km año	l/km año
1	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02911	0.10229	5934170	1372400	653914	531408
2	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	6249194	1428125	688903	552985
3	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	6412923	1456830	706952	564100
4	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	6580941	1486113	725474	575439
5	1.15	0.96	1.001	1.000	0.02915	0.10229	6753362	1515983	745288	587005
6	1.54	1.96	1.004	1.000	0.02924	0.10229	4620200	1030970	511333	399202
6.7	1.87	2.88	1.007	1.000	0.02931	0.10229	2310100	515485	256282	199601
7	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	7111874	1577538	784004	610840
8	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	7298205	1609247	804545	623118
9	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	7489418	1641593	825624	635642
10	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	7685641	1674589	847255	648419
11	1.15	0.96	1.001	1.000	0.02915	0.10229	7887005	1708248	870394	661452
12	1.54	1.96	1.004	1.000	0.02924	0.10229	5395763	1161723	597167	449831
12.7	1.87	2.88	1.007	1.000	0.02931	0.10229	2697881	580861	299303	224916
13	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	8305698	1777610	915609	688309
14	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	8523307	1813340	939598	702144
15	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	8746618	1849788	964216	716258
16	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	8975779	1886969	989478	730654

Año(s) de servicio	IRI	IRI f(PSI)	Factor de consumo de combustible (FCC)		Consumo de combustible por vehículo		Vehículos /año		Consumo de combustible por año	
			Liviano	Pesado	Liviano	Pesado	Vehículos livianos	Vehículos pesados	Liviano	Pesado
					gl/km	gl/km			l/km año	l/km año
17	1.15	0.96	1.001	1.000	0.02915	0.10229	9210944	1924897	1016502	745340
18	1.54	1.96	1.004	1.000	0.02924	0.10229	6301514	1309058	697410	506881
18.7	1.87	2.88	1.007	1.000	0.02931	0.10229	3150757	654529	349545	253441
19	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	9699921	2003055	1069307	775604
20	1.00	0.65	1.000	1.000	0.02912	0.10229	9954059	2043317	1097322	791194
TOTAL DE VEHÍCULOS EN 20 años										
							157295273	34022266	17355426	13173784

Tabla A.5

Estimación de emisiones de CO2 por consumo de combustible para una estructura de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

Año(s) de servicio	Consumo de combustible por año		Estimaciones de CO2	
	Liviano l/km año	Pesado l/km año	Liviano (gasolina)	Pesado (diésel)
1	653914	531408	2.32 g CO2/l	2.66 g CO2/l
2	688903	552985		
3	706952	564100		
4	725474	575439		
5	745288	587005		
6	511333	399202		
6.7	256282	199601		
7	784004	610840		
8	804545	623118		
9	825624	635642		
10	847255	648419		
11	870394	661452		
12	597167	449831		
12.7	299303	224916		
13	915609	688309		
14	939598	702144		
15	964216	716258		
16	989478	730654		
17	1016502	745340		
18	697410	506881		
18.7	349545	253441		
19	1069307	775604		
20	1097322	791194		
TOTAL EN 20 años	17355426	13173784	40265 kg CO2/km	35042 kg CO2/km

Tabla A.6
Estimación de energía asociada por consumo de combustible para una estructura de pavimento de hormigón asfáltico por 20 años.

Año(s) de servicio	Consumo de combustible por año		Energía asociada al combustible	
	Liviano l/km año	Pesado l/km año	Liviano (gasolina)	Pesado (diésel)
1	653914	531408	34.78 MJ/l	38.65 MJ/l
2	688903	552985		
3	706952	564100		
4	725474	575439		
5	745288	587005		
6	511333	399202		
6.7	256282	199601		
7	784004	610840		
8	804545	623118		
9	825624	635642		
10	847255	648419		
11	870394	661452		
12	597167	449831		
12.7	299303	224916		
13	915609	688309		
14	939598	702144		
15	964216	716258		
16	989478	730654		
17	1016502	745340		
18	697410	506881		
18.7	349545	253441		
19	1069307	775604		
20	1097322	791194		
TOTAL EN 20 años	17355426	13173784	603621714 MJ/km	509166738 MJ/km

ANEXOS

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483000632
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products

Relleno con material de préstamo local	1 m3
--	------

Avoided products

Resources

Materials/fuels

Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	8.704 MJ	diésel en tractor, rodillo, tanquero, volqueta
Sand, at mine/CH U	3047.5 kg	Lastre
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U	60.95 tkm	50 km de distancia lastre

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483000633
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products	
capa de sub base clase 2	1 m3

Avoided products

Resources

Materials/fuels		
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	14.02 MJ	diésel en motonivelador, rodillo, tanquero
Gravel, crushed, at mine/CH U	3120 kg	material de sub base clase 2
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	156 tkm	transporte de 50 km

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483000635
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products	
capa de base clase 2	1 m3

Avoided products

Resources

Materials/fuels		
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	14.02 MJ	diesel en motonivelador, rodillo, tanquero
Gravel, crushed, at mine/CH U	3419 kg	material de base clase 2
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	171 tkm	transporte de 50 km para base

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type Material
Process identifier ESPOL001000034483001099
Type
Process name
Status
Time period Unspecified
Geography Unspecified
Technology Unspecified
Representativeness Unspecified
Multiple output allocation Unspecified
Substitution allocation Unspecified
Cut off rules Unspecified
Capital goods Unspecified
Boundary with nature Unspecified
Infrastructure No
Date 30/7/2016
Record
Generator
External documents
Literature references
Collection method
Data treatment
Verification
Comment
Allocation rules
System description

Products
Asfalto de imprimación 1 m2

Avoided products

Resources

Materials/fuels
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U 0.006 MJ diésel de distribuidor de asfalto, escoba autopropulsada
Bitumen, at refinery/CH U 11.697 kg bitumen para imprimación
Transport, single unit truck, diesel powered/tkm/RNA 5.67299 tkm 485 km desde Esmeraldas a Obra

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type Material
Process identifier ESPOL001000034483000637
Type
Process name
Status
Time period Unspecified
Geography Unspecified
Technology Unspecified
Representativeness Unspecified
Multiple output allocation Unspecified
Substitution allocation Unspecified
Cut off rules Unspecified
Capital goods Unspecified
Boundary with nature Unspecified
Infrastructure No
Date 30/7/2016
Record
Generator
External documents
Literature references
Collection method
Data treatment
Verification
Comment
Allocation rules
System description

Products
Colocación capa de rodadura de asfalto 1 m2

Avoided products

Resources

Materials/fuels
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U 71.5733 MJ diésel de cargadora, distribidora, planta, rodillos, volquetas
Limestone, at mine/CH U 260 kg material de sub base clase 2
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U 130 tkm transporte de 50 km
Bitumen, at refinery/CH U 5 kg bitumen para asfalto
Transport, single unit truck, diesel powered/tkm/RNA 2.425 tkm 485 distancia desde refinería

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483001097
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	20/10/2015
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products		
hormigón para cunetas 180 kg/cm2 HH	1 m	

Avoided products

Resources

Materials/fuels		
Lubricating oil, at plant/RER U	2 kg	desmoldante
Cement, pozzolana and fly ash 15-40%, US only {US} market for Alloc Def, U	330 kg	cemento portland tipo IP
Sand {GLO} market for Alloc Def, U	746 kg	arena gruesa
Limestone, crushed, washed {GLO} market for Alloc Def, U	940 kg	pedra 3/4
Tap water, at user/RER S	183.6 kg	agua
Diesel, burned in building machine/GLO U	65.15 MJ	concretera y vidrador
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	84.3 tkm	50 km AGREGADOS
Transport, combination truck, diesel powered/US	16.5 tkm	50 km cemento

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483001223
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products

Remoción de capa asfáltica	1 m2
----------------------------	------

Avoided products

Resources

Materials/fuels

Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	4.273 MJ	diésel de recicladora y volqueta
Transport, single unit truck, diesel powered/tkm/RNA	7.104 tkm	37 km desde obra a relleno sanitario

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type Material
Process identifier ESPOL001000034483000674
Type
Process name
Status
Time period Unspecified
Geography Unspecified
Technology Unspecified
Representativeness Unspecified
Multiple output allocation Unspecified
Substitution allocation Unspecified
Cut off rules Unspecified
Capital goods Unspecified
Boundary with nature Unspecified
Infrastructure No
Date 20/10/2015
Record
Generator
External documents
Literature references
Collection method
Data treatment
Verification
Comment
Allocation rules
System description

Products
Acero de refuerzo 4200 kg/cm2 1 kg

Avoided products

Resources

Materials/fuels
Wire drawing, steel/RER U 0.05 kg proceso de elab de alambres
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U 0.055 tkm 50 km estimado, transporte aceros
Reinforcing steel, at plant/RER U 1.05 kg acero de refuerzo

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483001104
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products

Relleno con material de préstamo local HH	1 m3
---	------

Avoided products

Resources

Materials/fuels

Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	414676 MJ	diesel en tractor, rodillo, tanquero, volqueta
Sand, at mine/CH U	3047.5 kg	Lastre
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U	60.95 tkm	50 km de distancia lastre

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483001100
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products		
capa de sub base clase 2 HH		1 m3

Avoided products

Resources

Materials/fuels			
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	90963 MJ		diésel en motonivelador, rodillo, tanquero
Gravel, crushed, at mine/CH U	3120 kg		material de sub base clase 2
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	156 tkm		transporte de 50 km

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso Fecha:
Electricity Ecuador

30/7/2020 Periodo: 21:04

Process

Category type
Process identifier
Type
Process name
Status
Time period
Geography
Technology
Representativeness
Multiple output allocation
Substitution allocation
Cut off rules
Capital goods
Boundary with nature
Infrastructure
Date
Record
Generator
External documents
Literature references
Collection method
Data treatment
Verification
Comment
Allocation rules
System description

Material
ESPOL001000034483001225

Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
Unspecified
No
20/10/2015

Products

hormigón para pavimento 350 kg/cm2

1 m3

Avoided products

Resources

Materials/fuels

Lubricating oil, at plant/RER U
Cement, pozzolana and fly ash 15-40%, US only (US) market for | Alloc Def, U
Sand (GLO) market for | Alloc Def, U
Limestone, crushed, washed (GLO) market for | Alloc Def, U
Tap water, at user/RER S
Diesel, burned in building machine/GLO U
Diesel, burned in building machine/GLO U
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U
Electricity, at SNI, 2018 (2012 average - expansion) loss *
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RoW) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Alloc Def, U
Transport, combination truck, diesel powered/US

2 kg
330 kg
746 kg
940 kg
220 kg
71.72 MJ
4.41 MJ
84.3 tkm
0.64 kWh
16.5 tkm
16.5 tkm
desmoldante
cemento portland tipo IP
arena gruesa
piedra 3/4
agua
operación planta según paper 2 l/m3
pavimentadora encofrado deslizante
50 km agregados
kWh/m3 paper
5 km recorre mixer x 2,3 t/m3 de hormigón
50 km cemento

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483001102
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	30/7/2016
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products

Excavación y relleno en cunetas HH	1 m3
------------------------------------	------

Avoided products

Resources

Materials/fuels		
Diesel, burned in building machine/ECUADOR U	598.86 MJ	diesel en compactador manual

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto

proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type	Material
Process identifier	ESPOL001000034483000641
Type	
Process name	
Status	
Time period	Unspecified
Geography	Unspecified
Technology	Unspecified
Representativeness	Unspecified
Multiple output allocation	Unspecified
Substitution allocation	Unspecified
Cut off rules	Unspecified
Capital goods	Unspecified
Boundary with nature	Unspecified
Infrastructure	No
Date	20/10/2015
Record	
Generator	
External documents	
Literature references	
Collection method	
Data treatment	
Verification	
Comment	
Allocation rules	
System description	

Products

hormigón para bordillos 180 kg/cm2	1 m
------------------------------------	-----

Avoided products

Resources

Materials/fuels

Lubricating oil, at plant/RER U	2 kg	desmoldante
Cement, pozzolana and fly ash 15-40%, US only {US} market for Alloc Def, U	330 kg	cemento portland tipo IP
Sand {GLO} market for Alloc Def, U	746 kg	arena gruesa
Limestone, crushed, washed {GLO} market for Alloc Def, U	940 kg	piedra 3/4
Tap water, at user/RER S	220 kg	agua
Diesel, burned in building machine/GLO U	521 MJ	concretera y vidrador
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	84.3 tkm	50 km agregados
Transport, combination truck, diesel powered/US	16.5 tkm	50 km cemento

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8.3.0.0
Proyecto proceso
Electricity Ecuador

Process

Category type Material
Process identifier ESPOL001000034483001219
Type
Process name
Status
Time period Unspecified
Geography Unspecified
Technology Unspecified
Representativeness Unspecified
Multiple output allocation Unspecified
Substitution allocation Unspecified
Cut off rules Unspecified
Capital goods Unspecified
Boundary with nature Unspecified
Infrastructure No
Date 20/10/2015
Record
Generator
External documents
Literature references
Collection method
Data treatment
Verification
Comment
Allocation rules
System description

Products
Acero de refuerzo 4200 kg/cm2 hh 1 kg 100

Avoided products

Resources

Materials/fuels
Wire drawing, steel/RER U 0.05 kg proceso de elab de alambres
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER 0.055 tkm 50 km estimado, transporte aceros
Reinforcing steel, at plant/RER U 1.05 kg acero de refuerzo

Electricity/heat

Emissions to air

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Non material emissions

Social issues

Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

Calculated parameters

SimaPro 8. Impact assessment
 Project Electricity Ecuador

Calculation Analyze

Results: Impact assessment

Product: 1 km CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (of project Electricity Ecuador)

Method: CML-IA baseline V3.02 / EU25

Indicator: Characterization

Skip category Never

Exclude info No

Exclude low No

Sorted on impact category

Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	CONSTRUCCIÓN	E Acero de r	Asfalto de i	capa de ba	capa de su	Colocación	Desbroce,	Excavaciór	Excavaciór	Excavaciór
Abiotic dep kg Sb eq		0.029499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.45E-05
Abiotic dep MJ		3520666	0	84.1921	1047.231	38117.57	50441.13	1194228	987.0964	1435188	142.3476	39399.1
Global war kg CO2 eq		2911770	0	486.3816	109760.3	142576.1	173794.3	685720	88.21203	125302.3	12.42797	15389.76
Ozone layer kg CFC-11		0.590416	0	2.09E-05	0.134187	0.020692	0.025215	0.154083	1.07E-05	0.015614	1.55E-06	0.002498
Photochem kg C2H4 eq		533.1814	0	0.269026	36.62513	26.72318	32.57861	125.3942	0.020317	24.66675	0.002447	3.260603
Acidificatio kg SO2 eq		15239.6	0	1.71441	359.0514	775.5917	946.2164	3856.02	0.677847	962.5991	0.095474	84.0043
Eutrophica kg PO4--- eq		4104.276	0	1.063345	87.35137	230.49	281.0271	1008.807	0.158266	224.5768	0.022274	17.40131

hormigón ρ	hormigón ρ	hormigón ρ	Pozo de re	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Replanteo	Sumideros	Marcas de
0.008987	0.001422	0.004205	0.002721	0.002238	0.002692	0.002229	0.001921	0.00101	0.000495	0.000541	5.92E-05	0.000884	-8.5E-08
93625.03	14804.71	43761.15	71052.86	22939.42	25469.92	23465.67	16339.32	8869.497	4305.613	4848.26	197.6046	90338.23	-38.8023
25582.11	3201.503	9463.304	14491.13	4395.679	4808.54	4855.213	3017.19	1649.416	798.936	905.4772	15.8089	38631.47	-325.73
0.002969	0.00018	0.000533	0.000708	0.000266	0.000311	0.000317	0.000214	0.000114	5.56E-05	6.13E-05	1.96E-06	0.001231	-6.5E-05
3.951673	0.346971	1.02561	2.419309	0.772565	0.857484	0.834417	0.549809	0.298496	0.144895	0.163179	0.008731	13.6004	-0.10798
102.9874	9.319318	27.54692	42.2149	13.44708	15.36576	15.3018	10.26555	5.502209	2.681593	2.984158	0.124504	102.7809	-2.24756
25.48292	2.453719	7.252935	11.59317	3.126613	3.609673	3.625552	2.445317	1.305067	0.636898	0.705917	0.046815	48.99573	-0.85235

Relleno con material de préstamo local

0

341052.4

1547150

0.231197

258.7755

7905.352

2142.95

SimaPro 8. Impact assessment

Project Electricity Ecuador

Calculation Analyze

Results: Impact assessment

Product: 1 km RECAPEO HORMI, ASFÁLTICO (of project Electricity Ecuador)

Method: CML-IA baseline V3.02 / EU25

Indicator: Characterization

Skip category Never

Exclude info No

Exclude low No

Sorted on impact category

Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	RECAPEO	Remoción	Asfalto de	Colocación	Marcas de pavimento	HA	recapeo
Abiotic dep	kg Sb eq	-8.5E-08	0	0	0	0	-8.5E-08		
Abiotic dep	MJ	1266034	0	70797.51	1047.231	1194228	-38.8023		
Global war	kg CO2 eq	801335.7	0	6181.132	109760.3	685720	-325.73		
Ozone laye	kg CFC-11	0.288976	0	0.00077	0.134187	0.154083	-6.5E-05		
Photochem	kg C2H4 eq	163.1282	0	1.216805	36.62513	125.3942	-0.10798		
Acidificatio	kg SO2 eq	4260.308	0	47.48479	359.0514	3856.02	-2.24756		
Eutrophica	kg PO4--- eq	1106.385	0	11.07832	87.35137	1008.807	-0.85235		

SimaPro 8. Impact assessment
Project Electricity Ecuador

Calculation Analyze

Results: Impact assessment

Product: 1 km VIDA ÚTIL PAVIMENTO ASFÁLTICO (of project Electricity Ecuador)

Method: CML-IA baseline V3.02 / EU25

Indicator: Characterization

Skip category: Never

Exclude information: No

Exclude location: No

Sorted on: Impact category

Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	VIDA ÚTIL	CONSTRU	RECAPEO	RECAPEO	RECAPEO
Abiotic dep	kg Sb eq	0.029498	0	0.029499	-8.5E-08	-8.5E-08	-8.5E-08
Abiotic dep	MJ	7318769	0	3520666	1266034	1266034	1266034
Global warming	kg CO2 eq	5315777	0	2911770	801335.7	801335.7	801335.7
Ozone layer	kg CFC-11	1.457343	0	0.590416	0.288976	0.288976	0.288976
Photochemical	kg C2H4 eq	1022.566	0	533.1814	163.1282	163.1282	163.1282
Acidification	kg SO2 eq	28020.52	0	15239.6	4260.308	4260.308	4260.308
Eutrophication	kg PO4--- eq	7423.43	0	4104.276	1106.385	1106.385	1106.385

SimaPro 8.0.4.30 Impact assessment
 Project Electricity Ecuador

Calculation: Analyze
 Results: Impact assessment
 Product: 1 km CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO HIDRÁULICO (of project Electricity Ecuador)
 Method: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicator: Characterization
 Skip categories: Never
 Exclude infrastructure No
 Exclude long-term em No
 Sorted on item: Impact category
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	CONSTRUCCIÓN	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Tubería de	Pozo de re	Sumideros
Abiotic depletion	kg Sb eq	0.553234	0	0.000541	0.000495	0.00101	0.001921	0.002229	0.002692	0.002238	0.002721	0.000884
Abiotic depletion (foss MJ		7613604	0	4848.26	4305.613	8869.497	16339.32	23465.67	25469.92	22939.42	71052.86	90338.23
Global warming (GWF kg CO2 eq		3145403	0	905.4772	798.936	1649.416	3017.19	4855.213	4808.54	4395.679	14491.13	38631.47
Ozone layer depletion kg CFC-11		0.339229	0	6.13E-05	5.56E-05	0.000114	0.000214	0.000317	0.000311	0.000266	0.000708	0.001231
Photochemical oxidati kg C2H4 eq		508.607	0	0.163179	0.144895	0.298496	0.549809	0.834417	0.857484	0.772565	2.419309	13.6004
Acidification	kg SO2 eq	13577.66	0	2.984158	2.681593	5.502209	10.26555	15.3018	15.36576	13.44708	42.2149	102.7809
Eutrophication	kg PO4--- €	3768.287	0	0.705917	0.636898	1.305067	2.445317	3.625552	3.609673	3.126613	11.59317	48.99573

1.08E+07

Marcas de	Acero de r	Acero de r	Acero de r	Desbroce,	hormigón	hormigón	hormigón	hormigón	Juntas sim	Relleno co	Replanteo	Excavaciór	Excavaciór
-8.5E-08	0	0	0	0	0.008987	0.004205	0.001422	0.52505	-0.00131	0	5.9E-05	0	9.45E-05
-38.802	84.19324	13697.62	3002.218	987.2134	93625.03	43759.84	14804.71	5326972	-4729.06	341052.4	196.8142	1435188	39399.1
-325.728	486.3882	79131.76	17343.95	88.22248	25582.11	9463.022	3201.503	1120480	-1817.4	1547150	15.74567	125302.3	15389.76
-6.5E-05	2.09E-05	0.003402	0.000746	1.07E-05	0.002969	0.000533	0.00018	0.060147	-0.00021	0.231197	1.95E-06	0.015614	0.002498
-0.10798	0.26903	43.76911	9.593231	0.020319	3.951673	1.02558	0.346971	119.3524	-0.4019	258.7755	0.008696	24.66675	3.260603
-2.24754	1.714433	278.9255	61.13437	0.677927	102.9874	27.5461	9.319318	3238.721	-13.5004	7905.352	0.124006	962.5991	84.0043
-0.85234	1.063359	173.0006	37.91795	0.158285	25.48292	7.252719	2.453719	853.2666	-3.26749	2142.95	0.046627	224.5768	17.40131

capa de su Excavación y relleno en cunetas HH

0	0
37830.85	142.3476
130345.7	12.42797
0.018912	1.55E-06
24.43396	0.002447
709.6623	0.095474
210.7703	0.022274