

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE UN TRAMO ESPECÍFICO DE LA AUTOPISTA
PANAMERICANA SUR, USANDO LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO
DE VIDA**

Tesis para optar por el título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Daniel Verán Leigh

ASESOR: Ph.D. IAN VÁZQUEZ ROWE

Lima, Abril del 2017

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron durante esta importante etapa de mi vida académica. Principalmente a mis padres, Hugo y Claudia, quienes me brindaron un apoyo incondicional durante toda mi vida, acompañándome en los momentos difíciles y brindando la energía y el amor que me ayudó a cumplir todas mis metas trazadas hasta el día de hoy. A mis hermanos, Gonzalo y Rodrigo, que siempre estuvieron a mi lado en las buenas y malas. A mis familiares, a mis amigos cercanos que siempre me apoyaron durante la desafiante época de estudios universitarios en la PUCP, a los amigos de toda la vida y a Valeria por su compañía, cariño e impulso durante la elaboración de esta tesis. Quiero agradecer y dar un reconocimiento especial a los profesores que me enseñaron, aconsejaron y me inspiraron a ser un mejor profesional y más importante aún, una mejor persona.

Quiero agradecer a los profesionales que me apoyaron durante mi formación como ingeniero civil en mi etapa pre-profesional. Y finalmente, quiero agradecer a mi asesor, Ian Vázquez Rowe, por la paciencia y el gran apoyo dado durante todo el tiempo de elaboración de esta tesis como profesor, asesor y amigo.

Muchas gracias.

RESUMEN

La construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura vial en el mundo constituye un foco relevante del impacto ambiental, debido a los usos de materias primas y combustibles fósiles ligados a ellas. Mientras que la red vial en muchos países europeos y norteamericanos tuvo un crecimiento importante en las últimas décadas del siglo pasado, este auge se está viviendo en la actualidad en el Perú. En base a esta circunstancia, cada vez es más importante conocer cuáles son los impactos ambientales que se generan durante la construcción, mantenimiento y operación de estas infraestructuras. Por ello, se ha realizado una evaluación ambiental aplicando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, con el fin de determinar los impactos ambientales ligados a un tramo de la Panamericana Sur en el sur de la provincia de Lima.

Se evaluaron las etapas de construcción, uso y mantenimiento, a partir de una unidad funcional de 1 kilómetro de carretera en 1 año de operación. Para aplicar el ACV se utilizó la metodología ISO 14040 y se empleó la información primaria entregada por la empresa concesionaria durante la etapa de estudio como mediciones in situ y metrado de planos. Además, se usó información secundaria procedente de bases de datos internacionales para complementar la información restante y se modeló la emisión del material particulado. Se evaluaron indicadores de impacto ambiental como el cambio climático, el agotamiento de combustibles fósiles y otras materias primas, emisiones de material particulado, entre otros. Se utilizó la metodología de cálculo IPCC 2013 para cambio climático y ReCiPe para las demás categorías estudiadas.

En lo que refiere a los resultados, la etapa de uso representa un 99% del impacto total en todas las categorías de impacto. En lo que se refiere al cambio climático, se reveló que se producen 8 302 toneladas de CO₂eq por kilómetro de carretera producto del alto flujo vehicular que utiliza esta vía de acceso a la capital. Por otro lado, el 1% restante corresponde a la construcción y mantenimiento de la vía. Adicionalmente, la formación de partículas representó una importante fuente de impacto debido a las emisiones del vehículo en contacto con la carretera, la re-suspensión del material en la superficie y el desgaste de los frenos.

Finalmente, se analizan distintos escenarios alternativos y su impacto ambiental en contraste con el escenario base. Además, también se realizó una

comparación entre el escenario base y distintas investigaciones existentes en pavimentos en donde se obtiene que los resultados están en un mismo rango. Sin embargo, dicha comparación demuestra que la autopista analizada es la que presenta un mayor porcentaje de impacto durante su etapa de uso. Por último, los inventarios, resultados y análisis realizados en esta tesis podrían ser de gran ayuda para la elaboración de futuros proyectos de obras viales en el terreno costero nacional.



SUMMARY

The development, construction, maintenance and operation of roadways and transportation infrastructure generate important environmental impacts due to the use of raw materials and fossil fuels. While the road network in many European and North American countries grew significantly in the last decades of the past century, this trend is now occurring in Peru. Based on this fact, it is increasingly important to understand the environmental impacts generated during the construction, maintenance and operation of these infrastructures. Therefore, an environmental management tool has been carried out applying the Life Cycle Analysis (LCA) tool, in order to determine the environmental impacts linked to a section of the Panamericana Sur highway located in the south of the province of Lima.

The stages of construction, use and maintenance were evaluated using as a reference unit a functional unit of 1 kilometer of road in 1 year of operation. In order to apply the LCA, the framework applied was ISO 14040 and the primary information delivered by the concessionaire company during the study phase was used as in situ measurements. In addition, secondary information from international databases was used to supplement the remaining information and the emission of the particulate material was modeled. Environmental impact indicators such as climate change, depletion of fossil fuels and other raw materials, emissions of particulate matter, among others were evaluated. The assessment methods, IPCC 2013 for climate change, and ReCiPe for the remaining categories, were used in the case study.

Regarding the results, the use phase represents ca. 99% of the total impact in all impact categories. As far as climate change is concerned, it was revealed that 8,302 metric tons of CO₂ eq per kilometer of road are produced as a result of the high traffic flow that used this access road to the capital. On the other hand, the remaining 1% corresponds to the construction and maintenance of the road. Additionally, particulate matter formation represented a major source of impact due to vehicle emissions in contact with the road, re-suspension of the material on the surface and wear of the brakes.

Finally, different alternative scenarios and their environmental impacts were analyzed as compared to this baseline scenario. In addition, a comparison was made between the baseline scenario and other existing studies in roads where the results are found to be in a similar range. However, the results demonstrate that the analyzed

roadway is the one that presents a greater percentage of impact during its use phase. To sum up, it is considered that the analysis and results obtained in this thesis could be of great help for the elaboration and development of future roadwork projects in coastal Peru.



ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	iii
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	viii
Lista de Acrónimos:	x
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estado del arte	1
1.1.1 Infraestructura vial en el Perú y el mundo	1
1.1.2 Análisis del Ciclo de Vida como herramienta cuantitativa.....	2
1.1.3 Análisis de Ciclo de Vida en infraestructura vial.....	4
1.1.4 Políticas de mitigación a partir del análisis de ciclo de vida.....	5
1.2 Justificación:.....	7
1.3 Objetivos:	8
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1 Desarrollo del ACV a partir de la norma ISO 14040 y 14044	9
2.1.1 Definición de la línea base	9
2.1.2 Diseño del pavimento	11
2.1.3 Comparación entre el pavimento flexible (PS4) y el pavimento rígido (Peaje Punta Negra)	12
2.1.5 Diseño Geométrico	15
2.1.6 Metodología ISO 14040 y 14044 para la implementación del ACV	16
2.2 Definición de objetivos y alcance.....	17
2.3 Adquisición de datos	20
2.4 Inventario de Ciclo de Vida.....	22
2.4.1 Cálculo de emisiones de material particulado	23
2.4.2 Modelado del Inventario de Ciclo de Vida	28
2.5 Evaluación de impactos ambientales.....	41
2.6 Interpretación de resultados	48

2.7 Análisis de sensibilidad	48
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	50
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	54
4.1 Análisis del impacto ambiental de la PS4	54
4.1.1 Análisis del impacto ambiental: Etapa de construcción	54
4.1.2 Análisis de impacto ambiental: Etapa de mantenimiento.....	56
4.1.3 Análisis de impacto ambiental: Etapa de operación	56
4.1.4 Análisis de impacto ambiental: Sistema PS4	57
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS:.....	71



Lista de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica del tramo PS4.

Figura 2: Pavimento flexible en un tramo de la PS4 (Carpeta asfáltica).

Figura 3: Pavimento rígido del Peaje ^{Punta} Negra en la PS4.

Figura 4: Vista de planta del Peaje Punta Negra.

Figura 5: Ilustración del pavimento rígido perteneciente a la PS4

Figura 6: Ilustración del pavimento flexible perteneciente a la PS4

Figura 7: Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.

Figura 8: Límites del Sistema.

Figura 9: División del inventario de Ciclo de Vida en subsistemas.

Figura 10: Vista en planta de una isleta de cobro.

Figura 11: Fases de evaluación de impacto ambiental.

Figura 12: Resultados finales escenario base A1.

Figura 13: Impacto ambiental en la categoría de CC para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año.

Figura 14: Impacto ambiental en la categoría de PMF para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año.

Figura 15: Impacto ambiental en la categoría de TA para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año.

Lista de tablas

- Tabla 1:** Clasificación de carreteras en el Perú por demanda.
- Tabla 2:** Información Primaria, brindada por la empresa Rutas de Lima.
- Tabla 3:** Factor multiplicador K, según tamaño de partículas.
- Tabla 4:** Peso de los vehículos según tipología.
- Tabla 5:** Cantidad de Emisión Anual por re-suspensión de material particulado.
- Tabla 6:** Factor de Emisión, según el tipo de vehículo y kilómetro recorrido.
- Tabla 7:** Cantidad de Emisión Anual producida por el desgaste de los frenos.
- Tabla 8:** Factores de emisión según el tipo de vehículo y kilómetro recorrido.
- Tabla 9:** Cantidad de emisión anual producida por el desgaste de los neumáticos.
- Tabla 10:** Inventario materiales carpeta asfáltica PS4.
- Tabla 11:** Inventario maquinaria construcción pavimento flexible.
- Tabla 12:** Inventario pavimento antiguo.
- Tabla 13:** Inventario pavimento nuevo.
- Tabla 14:** Inventario Peaje Punta Negra.
- Tabla 15:** Inventario marquesinas.
- Tabla 16:** Inventario pavimento rígido.
- Tabla 17:** Inventario isletas.
- Tabla 18:** Inventario maquinaria construcción Peaje Punta Negra.
- Tabla 19:** Inventario mantenimiento PS4.
- Tabla 20:** Consumo eléctrico anual.
- Tabla 21:** Inventario tráfico vehicular PS4.
- Tabla 22:** Inventario tráfico vehicular PS4.
- Tabla 23:** Sustancias contaminantes para cada categoría de impacto.
- Tabla 24:** Resultados de impacto ambiental producidos por la etapa de construcción de la carpeta asfáltica de la PS4.
- Tabla 25:** Resultado impacto ambiental producido por la etapa de construcción del Peaje Punta Negra.

Tabla 26: Resultados de impacto ambiental producidos por el flujo vehicular en la PS4.

Tabla 27: Resultados de impacto ambiental para 1 año de mantenimiento en la PS4.

Tabla 28: Resultados 1km de carretera construido y operado en un año.

Tabla 29: Opciones de mitigación consideradas en el sector transporte por la *Intended Nationally Determined Contributions* (iNDC) (MINAM, 2016).

Tabla 30: Comparación de las emisiones de CO₂eq (t) por año de operación para 1 kilómetro de carretera entre la autopista PS4 y otras infraestructuras viales evaluadas en la literatura.



Lista de Acrónimos:

ACV- Análisis de Ciclo de Vida

AAP- Asociación Automotriz del Perú

BCR- Banco Central de Reserva

CC- Cambio Climático

CMNUCC- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

COP- Conferencia de las Partes

EC- European Commission

EIA- Estudio de Impacto Ambiental

EPA- Environmental Protection Agency

ETC- Electronic Toll Collection

FD- Fossil Depletion

GEI- Gases de Efecto Invernadero

ICV- Inventario de Ciclo de Vida

IMDA- Índice medio diario anual

iNDC- intended Nationally Determined Contributions

INEI- Instituto Nacional de Estadística e Informática

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO- International Organization for Standardization

MD- Metal Depletion

MINAM- Ministerio del Ambiente

MTC- Ministerio de Transportes y Comunicaciones

PBI- Producto Bruto Interno

PM- Particulate Matter

PMF- Particulate Matter Formation

PN- Panamericana Norte

POF- Formation of Photochemical Oxidants

PS- Panamericana Sur

PS4- Panamericana Sur 4

RPCV- Red Peruana de Ciclo de Vida

SI- Sistema Internacional de Unidades

TA- Terrestrial Acidification



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

1.1.1 Infraestructura vial en el Perú y el mundo

La infraestructura vial tiene una influencia importante en la sociedad y el medio ambiente. De hecho, la interacción entre la infraestructura vial y el medio ambiente, debido a su amplitud y complejidad, ha sido motivo de estudio de manera reiterada en las últimas décadas, dado que afecta directamente el crecimiento económico de un país mediante la conexión de los mercados y la disminución del costo de transporte (Pachón, 2006). Este sistema de carreteras y autopistas depende mucho de las características geográficas y condiciones geotécnicas en las que se realizará el trabajo, a la vez, una red de carreteras contiene una gran cantidad de componentes denominados “Obras de arte” como alumbrado, señalización vertical y horizontal, puentes, túneles y entre otros componentes que hacen de su estudio y construcción un análisis detallado e importante para el desarrollo de un país (Stripple, 2001).

La infraestructura del transporte, especialmente las carreteras, son muy importantes en el crecimiento y desarrollo de un país, dado que el transporte de pasajeros, así como el de carga, ha venido mostrando una gran influencia en el desarrollo de este, con el consiguiente aumento de la producción, del consumo y mejora del nivel de vida de la población (Perez, 2005).

Con respecto a la infraestructura vial en el Perú, esta está compuesta por más de 78 000 km de carreteras y autopistas, donde el objetivo de la actual gestión del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) es pavimentar el 85 % de la red vial, siendo la prioridad el asfaltado de la carretera longitudinal de la Sierra. Para Julio del 2016, solo resta el 15% del objetivo previsto por el MTC. Esto demuestra un gran avance en la construcción de infraestructura vial en el Perú, dado que para el año 2011 solo se tenía 53.6 % de vías asfaltadas. Dividiéndose en tres categorías de acuerdo a su magnitud y distancias de recorrido: vecinal, departamental y nacional (MTC, 2015), comprobando así el interés y compromiso del Estado por aportar al desarrollo y crecimiento del país a partir de la construcción de vías. Siendo uno de los objetivos del Estado, a partir del desarrollo de las redes viales, reducir los costos de transporte, haciendo viable mejorar la calidad de vida de los pobladores de las zonas rurales del país, debido al aumento de producción en los terrenos agrícolas (Gallardo, 2016).

Se estima que el sector construcción llegará a ser 2.5% del Producto Bruto Interno (PBI) nacional, por el avance en la ejecución de la cartera de proyectos de infraestructura que el Banco Central de Reserva (BCR) cuantifica en \$4400 millones para el periodo 2015-2017 (CCL, 2016). Siendo la construcción de infraestructura vial una actividad económica importante en el contexto económico nacional, ya que posee varias partes involucradas en el proceso de construcción y mantenimiento.

Con respecto a la tecnología y procesos para la construcción de carreteras en el Perú, estos han evolucionado en gran medida debido a mejores técnicas, tecnologías y materiales estipulados por el MTC a partir del manual de "Especificaciones técnicas generales para construcción" (MTC, 2013), en donde se detallan todos las tecnologías y materiales a utilizar como asfalto, concreto, entre otros. Junto con el uso adecuado de la aplicación del asfalto como por ejemplo: la colocación del asfalto en caliente y en frío de acuerdo a las características del terreno, el tipo de suelo, condiciones climáticas de la zona en la cual se realizará el proyecto, entre otras características para que la elaboración de la carretera se realice de forma correcta.

1.1.2 Análisis del Ciclo de Vida como herramienta cuantitativa

Todo proyecto requiere, para ser aprobado, de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) ya sea detallado o no de acuerdo a la magnitud del proyecto (MTC, 2017). Este documento técnico administrativo se utiliza porque proporciona una evaluación detallada de los impactos ambientales que ocasionará el proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado, todo ello con el fin de que la administración competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo. Este se constituirá como una herramienta para la toma de decisiones enfocada en prevenir, mitigar y/o compensar los impactos significativos negativos y potenciar aquellos positivos que se identifiquen (Calidad Ambiental Cía. Ltda., 2013). El EIA sirve para la mitigación de impactos ambientales en la elaboración de proyectos de construcción hasta cierto punto, dado que su carácter cualitativo para la determinación de la viabilidad de un proyecto es limitado, tal como reconocen los autores Sánchez y Hacking, porque los detalles se centran en la aprobación del proyecto, mas no en los detalles técnicos de la cuantificación del impacto (Sánchez y Hacking, 2002). Esto hace necesaria la búsqueda de una herramienta cuantitativa, para así poder tener una información integral de los impactos ambientales generados y/o creados a partir de este tipo de proyectos (infraestructura vial).

Una herramienta que cumple con esta característica cuantitativa para aportar al EIA en el control de proyectos es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual es una herramienta relativamente reciente cuya utilización ha comenzado a ser difundida a partir de la década de 1990 (Carlson, 2011). Esta herramienta sirve como una metodología ambiental que toma en cuenta todas las etapas de la producción de un determinado producto o servicio de principio a fin, desde la exploración y suministros de materiales y combustibles, a la producción y operación del producto o servicio investigado, hasta su eliminación/reciclaje (Pehnt, 2006; Tukker, 2000). El ACV está estandarizado y normado por la *International Organization for Standardization (ISO) 14040*. Esta normativa presenta 4 fases del ciclo de vida que generalmente están interrelacionadas; estas fases son: definición del objetivo y alcance, inventario del ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida y la interpretación de los resultados obtenidos en el ciclo de vida. Por otro lado, el ACV permite elaborar estrategias medioambientales en todo tipo de procesos utilizando una perspectiva de ciclo de vida, lo cual significa identificar los principales flujos de materia y energía que se generan a lo largo de toda la vida útil de producto o servicio. (ISO, 2006a; 2006b).

El ACV en Europa está siendo implementado por las empresas con fines ligados al medio ambiente y también con propósitos de producción, como por ejemplo: realizar un seguimiento de los impactos generados al producir un producto y evaluar, a partir de una perspectiva amigable con el medio ambiente, la toma de decisiones con un mayor enfoque ambiental, formulando nuevas políticas de solución en las empresas (Lewandowska, 2011). Enfocándose en concientizar a los consumidores del producto elaborado, para que los clientes opten por elegir estos productos realizados con ACV comprobando su sostenibilidad y apoyo al medio ambiente, frente a los otros productos que no poseen un estudio de ACV, incitando a que el comprador de forma consciente elija este producto (Hellweg y Mila i Canals, 2014). Además, el ACV se utiliza como una herramienta de gestión, ya que el analizar los productos durante toda su etapa de ciclo de vida permite que se puedan identificar y examinar los procesos a detalle, para así poder identificar errores o procesos improductivos y así eliminarlos o modificarlos para mejorar la calidad y la producción del producto estudiado, simplificando el alcance y las incertidumbres, generando mayor productividad en la generación del producto, aumentando ganancias económicas y la calidad de desarrollo de la empresa (Hellweg y Mila i Canals, 2014).

Finalmente, el ACV nos permite evaluar los distintos aspectos ambientales denominados categorías de impacto tales como, emisión de gases de efecto

invernadero (GEIs), uso de combustibles fósiles (hidrocarburos), consumo de energía, uso y agotamiento de recursos, acidificación, eutrofización, entre otros indicadores que serán aclarados más adelante.

1.1.3. Análisis de Ciclo de Vida en infraestructura vial

Siendo los proyectos de infraestructura vial de gran envergadura y periodos de tiempo (la concesión de una carretera varía de acuerdo al contrato realizado), el uso de ACV ya es una realidad que se practica en el exterior. El primer estudio completo de ACV fue realizado en Europa en una carretera ubicada en Suecia, en donde se adaptó la metodología para aplicarla a una infraestructura vial. Este estudio se desarrolló en una época en donde las bases de datos y los métodos de análisis no estaban desarrollados, por lo que los resultados presentan una incertidumbre considerable. No obstante, este informe es de suma importancia por ser el primer estudio completo realizado y que planteó las bases para los estudios actuales (Stripple, 2001). Adicionalmente, importantes estudios parciales se han enfocado en distintas fases del ciclo de vida de la carretera tales como, uso de nuevos materiales más sostenibles (Mroueh et al., 2000; Park et al., 2003), comparaciones en el impacto producido entre distintas carreteras (Carlson, 2011; Milachowski et al., 2011) y el uso de simuladores para el desarrollo de escenarios alternativos al escenario base (Birgisdóttir et al., 2005; Huang et al., 2009a).

Sin embargo, en el Perú se dispone de poca información respecto al uso de esta herramienta en la construcción de las carreteras y autopistas. Con respecto al uso del ACV en los países europeos, los cuales tienen políticas más rigurosas con respecto al impacto ambiental, la metodología ACV se cumple de forma eficiente. Puesto que al ser un método flexible, se ajusta a cada proyecto que se vaya a ejecutar, facilitando la implementación de factores sostenibles desde la etapa de diseño en los proyectos viales (Carlson, 2011).

A partir del inicio del uso del ACV para la construcción de carreteras, se ha ido mejorando la herramienta puesto que ha ido creciendo la base de datos que la soporta con datos muy detallados para Europa o Estados Unidos (Noshadravan et al., 2013; Mroueh et al., 2000; Milachowski et al., 2011; Huang et al., 2009a). Además, junto con el mejoramiento de la base de datos, a medida que se implementa el ACV se obtienen resultados del impacto que generan los proyectos. A partir de estos resultados se pueden proponer nuevos procesos y nuevas tecnologías, como por

ejemplo el reuso y reciclado de asfalto en la construcción de carreteras, reduciendo así impactos ambientales significativos como el consumo de materiales, emisión de GEIs y consumo de energía (Huang et al., 2009b).

En el Perú no hay muchos estudios publicados de ACV en infraestructura vial a excepción del estudio de ACV enfocado en la selva del Manu en Cusco. Esta está principalmente enfocada en la cuantificación del impacto ambiental que se podría generar con la construcción de una carretera no pavimentada en las cercanías de la reserva nacional del Manu. La investigación se enfocó en la cuantificación del calentamiento global (emisiones de GEIs) que podría producir la construcción de este tipo de infraestructura, donde además, al encontrarse en una zona sensible, por su extensa variedad de flora y fauna, los cambios podrían ser de mayor impacto (Larrea-Gallegos et al., 2016).

En el Perú la mayoría de investigaciones para el desarrollo de la metodología del ACV se han enfocado en los últimos 6 años en los sectores agroindustrial, pesquero y energético (Avadí et al., 2014; Quispe et al., 2016; Vázquez-Rowe et al., 2015, 2016, 2017). Esta nueva metodología en el contexto local está siendo principalmente explotada por el grupo de investigación Red Peruana de Ciclo de Vida (RPCV), el cual viene contribuyendo con la aplicación de esta metodología de cuantificación de impacto ambiental en los sectores energéticos y agroindustrial desde el año 2005; brindando buenos resultados y contribuyendo a la sostenibilidad en la generación de productos y proyectos en el entorno local.

Por otro lado, en base a la adecuada implementación de la herramienta del ACV en una carretera o autopista en el territorio nacional, se podrían obtener resultados que puedan ayudar a cumplir con los objetivos ambientales en la industria privada y pública, significando no solo una mejora ambiental sino también una mejora de herramientas y procesos para la industria de la construcción. Una autopista es una obra de mucha importancia en el desarrollo del país, por su importante tráfico de vehículos livianos, públicos y de carga pesada.

1.1.4. Políticas de mitigación a partir del análisis de ciclo de vida

Existen políticas de mitigación contra los impactos ambientales que se han desarrollado a partir del ACV, como el reciclaje y reuso de ciertos materiales de construcción, como es el caso del asfalto y neumáticos.

Con respecto al reciclaje de asfalto, este se viene realizando en países europeos desde la década de los años noventa y en Sudamérica y Perú desde la segunda década del siglo XXI (López, 2016). Esta técnica de reciclaje de pavimento se puede realizar a partir de los procedimientos en caliente y en frío. Constituye una solución importante al cambio climático ya que al reutilizar los materiales procedentes de las capas de asfalto extraídas por su antigüedad o deterioro de sus propiedades por tiempo de servicio, se aprovecha de los recursos disponibles en obra, disminuyendo la demanda de materiales (agregados, asfaltos, entre otros), eliminando la necesidad de canteras, transporte de materiales y, finalmente, contribuyendo a reducir la contaminación ambiental (López, 2016).

Este reuso de materiales índice de forma significativa en la disminución del impacto ambiental, puesto que se disminuye la cantidad de impacto producido por la extracción de materia prima, traslado y manufactura de dichos materiales. Sin embargo, lo relevante del reciclaje y reuso de ciertos materiales, es que también aporta a la calidad del producto (autopista) a construir. Este es el caso de los neumáticos. En España se ha comprobado que el uso de polvo de neumáticos de caucho dota al asfalto de flexibilidad, mejorando su prestación técnica para diferentes tipos de vías. El pavimento rígido, al mezclarse con polvo de neumático, se desenvuelve mejor frente a las deformaciones producidas por el tránsito de vehículos, reduciendo la aparición de grietas y fisuras en el concreto, mejorando su resistencia y acabado de la superficie del pavimento (Bermejo, 2016). Con respecto a Sudamérica y Perú, aún no se aplica este tipo de reciclaje a partir del reuso de neumáticos de caucho, el cual podría aportar tanto al medio ambiente como a la calidad del producto realizado en las carreteras y autopistas nacionales.

Finalmente, la realidad de implementar esta metodología en el contexto nacional es cercana, dado que al día de hoy el Perú, al formar parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) está implementando/fortaleciendo sus políticas ambientales, a partir de tratados internacionales como el último firmado en la Conferencia de las Partes (COP) 21 en París. Es ahí en donde se compromete a partir de la propuesta de las iNDC (*intended Nationally Determined Contributions*) a cumplir con reducir en un 31% las emisiones de GEIs respecto a las proyectadas para el 2030 (iNDC, 2015). El ACV se presenta como una opción viable en este contexto, dado que permite monitorear las emisiones de GEIs durante el desarrollo de las 4 sub etapas de cada proyecto: extracción de

materiales, construcción del proyecto, operación y mantenimiento; y finalmente el cierre del proyecto.

1.2 Justificación:

La lucha contra el cambio climático y el calentamiento global es una prioridad para la mayoría de países del mundo. Por ello, se han establecido en los últimos años distintos acuerdos y tratados para la mitigación de este problema global. El Perú en la actualidad ha firmado el Tratado de París, ratificado el 22 de abril de 2016. En este tratado, dentro de las propuestas de mitigación, se incluyen apartados específicos ligados al sector transporte (iNDC, 2015).

Por lo tanto, la investigación y la aplicación de nuevos métodos y tecnologías con fines medioambientales se encuentra en auge a nivel mundial, siendo la industria de la construcción una de las más beneficiadas. Para la construcción de autopistas una de las herramientas más adecuadas para monitorear los impactos ambientales es el ACV. Esta se basa en la investigación y evaluación de impactos ambientales del producto o servicio durante todas las etapas de su desarrollo.

El Perú es un país de grandes dimensiones y una gran diversidad geográfica; cuenta con un sistema de transporte terrestre compuesto por más de 78 000 km de infraestructura vial (MTC, 2015). Debido a la magnitud de estos proyectos y sus extensos periodos de mantenimiento, son responsables de un significativo impacto ambiental. En consecuencia, se considera que el ACV es una herramienta estratégica para poder hacer un análisis profundo y a detalle de los impactos ambientales ligados a la construcción de una autopista. Se eligió aplicar la herramienta en un tramo de la autopista Panamericana Sur (PS), porque esta es una de las 3 principales vías de acceso a la ciudad capital (Lima).

Una vez elaborado el análisis, se pueden obtener los impactos ambientales ocasionados de forma directa e indirecta en el entorno adyacente del tramo bajo estudio. A partir de estos resultados se buscará proponer nuevas alternativas ambientalmente sostenibles para la mejora de la construcción, operación y mantenimiento del tramo de la autopista analizada. Estas soluciones aportarán para la construcción de las nuevas vías por implementar en el territorio nacional y para realizar un mejor y eficiente mantenimiento de las carreteras y autopistas a partir de la aplicación de nuevas técnicas, tecnologías y materiales para la construcción de infraestructura vial.

1.3. Objetivos:

Objetivo General:

El objetivo principal de esta tesis de pregrado es realizar una evaluación ambiental de la construcción, mantenimiento y operación en un tramo desértico de 22.429km de la Panamericana Sur, a través de la aplicación de la metodología del ACV, teniendo en cuenta la relación directa e indirecta con el medio ambiente que la rodea, entendiendo así las consecuencias realizar un proyecto de tal magnitud.

Objetivos específicos son:

1. Identificar una línea base para la construcción, mantenimiento y operación de autopistas, en base a información obtenida de fuentes bibliográficas y datos primarios proporcionados por la empresa concesionaria (Rutas de Lima).
2. Definir un escenario de análisis de la autopista, así como escenarios alternativos.
3. Recolectar datos de inventario del escenario base y de los escenarios alternativos.
4. Desarrollar el Inventario del Ciclo de Vida (ICV).
5. Analizar el Impacto del Ciclo de Vida, utilizando el software Simapro v8.2
6. Interpretar los resultados obtenidos en el ACV.
7. Definir alternativas ambientalmente sostenibles para la mejora del tramo de la autopista analizada.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Desarrollo del ACV a partir de la norma ISO 14040 y 14044

Con respecto a la metodología que requiere el proyecto de investigación, se usó el protocolo definido en las normas ISO 14040 y 14044, que detallan los pasos a seguir para el desarrollo de un ACV (ISO, 2006a, 2006b).

2.1.1 Definición de la línea base

Antes de comenzar a realizar el análisis, se identificó una línea base para la construcción, mantenimiento y operación de las carreteras y autopistas, en base a fuentes bibliográficas e información proporcionada por la concesionaria (Rutas de Lima). Esta recopilación se realizó a partir de una búsqueda bibliográfica que abarcó libros, artículos científicos, documentos públicos locales e internacionales, páginas web oficiales, entre otras referencias relacionadas con la investigación.

Puesto que la autopista PS tiene un trayecto muy extenso, se optó por utilizar para el análisis una sección de dicha vía. Se evaluó y definió que el tramo más indicado y viable para analizar era el tramo número cuatro de la concesión perteneciente a la empresa Rutas de Lima, PS4, ubicada entre el balneario de Punta Hermosa y el Óvalo de Pucusana, que abarca entre el km 35+751 y el final de la concesión en el km 58+000 (ver Figura 1).



Figura 1: Ubicación geográfica del tramo PS4

Fuente: Adaptado de Google Earth 2016

La elección de dicho tramo se realizó en base a dos criterios principales. Por un lado, debido al vínculo laboral del tesista con la empresa concesionaria, lo que facilitó la recolección de los datos de la vía. En este sentido, se habilitaron las autorizaciones y se dieron facilidades para poder tener acceso a ciertos datos a la hora de hacer la recopilación de los mismos. Por otro lado, al ser una concesión que parte desde un tramo urbano (Av. Javier Prado en Lima), se decidió analizar el tramo de la concesión más alejado del sector urbano, con fines de enfocar la realización de la investigación en una autopista realizada en un ambiente desértico, el cual es representativo de gran parte de dicha autopista en su extensión hacia el sur de la ciudad de Lima.

A pesar que la PS4 está ubicada en una zona desértica, el tramo elegido es la principal arteria de salida de Lima hacia el sur, lo que hace de este tramo una zona de alto tránsito vehicular, aunque variable de manera estacional, siendo más propensa a una mayor congestión vial en época estival. El tramo de autopista elegido posee dos tipos de pavimentos a lo largo de su recorrido: pavimento asfáltico, ubicado a lo largo de la autopista de la PS4, y pavimento rígido, en el peaje de Punta Negra, como se observan en las Figuras 2 y 3, respectivamente.



Figura 2: Pavimento flexible en un tramo de la PS4 (Carpeta asfáltica).

Fuente: Personal



Figura 3: Pavimento rígido del Peaje Punta Negra en la PS4.

Fuente: Personal

2.1.2 Diseño del pavimento

El pavimento, en este caso flexible y rígido, es el conjunto de capas de material seleccionado que reciben de forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe de funcionar eficientemente durante un periodo de tiempo que varía entre 30 a 50 años dependiendo del flujo de vehículos, ambiente en donde se realiza el pavimento y las propias características de diseño del mismo. Debido a que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores y los de menor capacidad a mayor profundidad. En estas últimas, la recomendación es que se utilicen materiales que se encuentren en la naturaleza, ya que al no ser procesados a través de la tecnósfera resultan ser más económicos (Gutiérrez, 2004).

Esta división de capas también obedece a un factor económico, ya que cuando se determina el espesor de las mismas, se debe de determinar el grosor mínimo que cumpla con los esfuerzos impartidos en el pavimento, siendo de gran importancia los procesos constructivos de compactación y el contenido de humedad del material granular, dado que con una compactación correcta y un contenido de humedad óptimo, el material se acomoda de forma adecuada. Una vez consolidado, disminuye la posibilidad de que aparezcan deformaciones permanentes producidas por las cargas de los vehículos que transiten sobre el pavimento (Ortega, 2015).

La capa del terreno que se encuentra por debajo del sistema se denomina subrasante. Esta soporta la estructura del pavimento, que se extiende hasta la profundidad en la que no afecte la carga originada por el tránsito previsto. Esta capa es de importancia puesto que sirve como parámetro para determinar el espesor del pavimento, considerada también como la cimentación de este, ya que cumple la función principal de soportar las cargas que transmite el pavimento.

La base y sub-base conforman una capa de la estructura destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento. Además, se utilizan como capas drenantes y controladoras de la ascensión capilar del agua, protegiendo así la estructura del pavimento, empleándose generalmente para tal fin materiales granulares (Hilton, 2010).

2.1.3 Comparación entre el pavimento flexible (PS4) y el pavimento rígido (Peaje Punta Negra)

El pavimento flexible de asfalto posee un espesor que se diseña en base a las características de la zona, dado que depende de condiciones climáticas, flujo vehicular, cantidad de cargas portantes que debe de soportar la estructura, tipo de mantenimiento, erosiones producidas por el medio ambiente, entre otros factores representativos de toda construcción de infraestructura (Lizcano, 2003). Para el caso de la autopista PS4, su espesor fue diseñado, en su inicio, con un grosor de 8 cm. Posteriormente, se añadió en el último mantenimiento realizado por la concesionaria una sobrecapa de 4 cm de espesor con una nueva mezcla asfáltica como parte del programa de mantenimiento de la vía.

El pavimento flexible está compuesto de tres capas: sub-base, base y carpeta asfáltica. La base y la sub-base son de características similares, siendo las de sub-base de una calidad inferior. Ambas son las capas de material que se construyen directamente sobre el terraplén y sirven principalmente para:

- Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la capa base.
- Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.
- Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad.

Los materiales utilizados para la base y la sub-base son agregados obtenidos de canteras autorizadas como agregados finos (arenas) y gruesos (grava) que cumplan con las características de dureza, resistencia, durabilidad y que no cuenten con la presencia de materia orgánica, debiendo cumplir con lo especificado en el diseño de la construcción.

La carpeta asfáltica, por otro lado, está compuesta de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base. Las funciones principales de esta capa son:

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito fácil y cómodo para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Soportar el desgaste producido por el tránsito y por el clima.
- Mantener una superficie cómoda y segura (antideslizante) para el rodamiento de vehículos.
- Mantener un grado de flexibilidad para cubrir los asentamientos que presente la capa inferior (base o sub-base).

Los materiales utilizados para la construcción de la carpeta asfáltica son los siguientes: mezcla de agregados finos y gruesos de distintas medidas (según lo especificado en el diseño), ligante bituminoso de un determinado tipo de asfalto y agua. Por otro lado, los materiales de los cuales está compuesto el pavimento rígido son una base granular (sin sub-base granular) y una capa de losa de concreto. La base está compuesta de los mismos materiales y cumple con las mismas funciones que en el pavimento flexible. Por otro lado, el concreto está compuesto de cemento, agua, agregados finos y gruesos, cumpliendo con un diseño por resistencia a compresión para poder soportar las cargas de los vehículos transitorios (Rattia, 2014).

En este proyecto se analizaron dos tipos de pavimentos (flexible y rígido), siendo la transferencia de cargas y la deformación del pavimento los principales factores para la elección de estos. Por un lado, en los pavimentos flexibles, las cargas son transmitidas de “grano a grano” a través de la estructura granular del pavimento y a la vez, poseen una mayor cantidad de deformación y flexibilidad, haciéndolos similares a una capa elástica. Esta capacidad de actuar como una capa elástica, hace que tengan un mejor funcionamiento en autopistas. Sin embargo, tiende a fallar por erosión ante un gran flujo vehicular, requiriendo un mantenimiento continuo (Sotil, 2014).

Por otro lado, en el caso de los pavimentos rígidos, las cargas de las llantas son transmitidas a la subrasante por la fuerza estructural del pavimento como un conjunto que actúa de manera similar a un plano rígido. Por lo tanto, estos pavimentos tienen menor capacidad de tracción. Con respecto a su mantenimiento, este es mínimo, dado que generalmente solo se realiza en las aberturas de las juntas

de dilatación y contracción. Para el caso de los peajes, situación en la que los vehículos se detienen generando una carga puntual sobre el pavimento, los pavimentos rígidos son la mejor opción porque reciben menor tracción por su estructura y tienen una mayor resistencia frente a las cargas puntuales (Sotil, 2014). El plano del Peaje Punta Negra, vista en planta, se puede observar en la Figura 4.

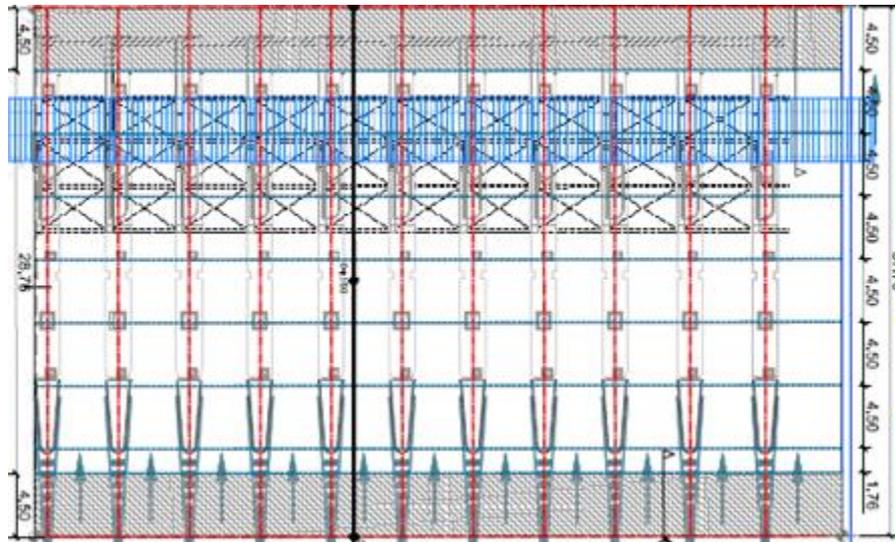


Figura 4: Vista de planta Peaje Punta Negra

Fuente: Rutas de Lima

El pavimento rígido del Peaje Punta Negra presenta las siguientes características geométricas: está dividido en 11 carriles de losa de concreto, cuyas anchuras varían entre 5.0 metros para vehículos livianos y 5.9 metros para vehículos de carga ancha. Se utilizó en su construcción concreto armado de alta resistencia a compresión, así como juntas longitudinales y transversales de barras de acero corrugadas y lisas, respectivamente. En las Figuras 5 y 6, se puede observar el diseño del pavimento rígido y flexible, respectivamente.

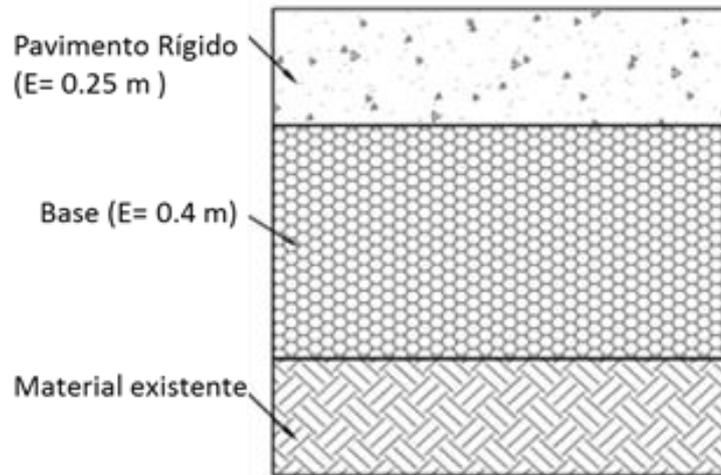


Figura 5: Ilustración del diseño del pavimento rígido perteneciente a la PS4

Fuente: Adaptación personal

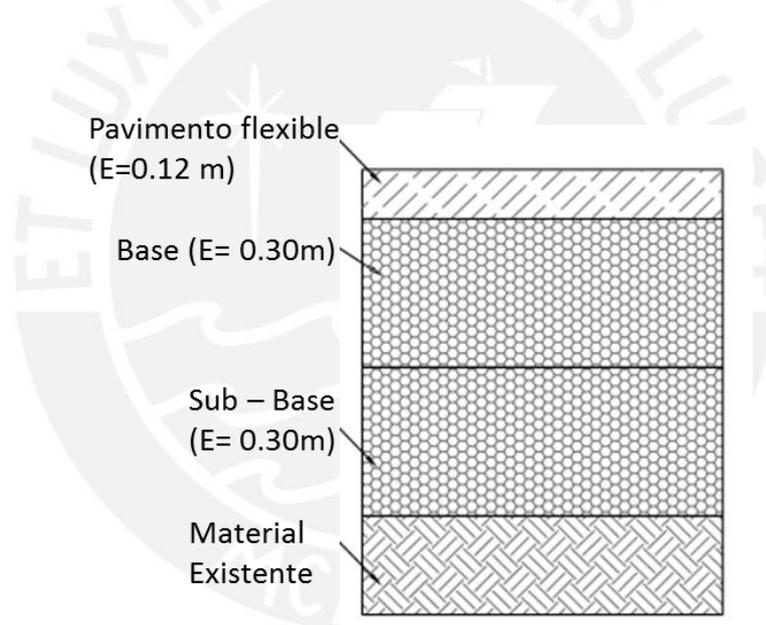


Figura 6: Ilustración del diseño del pavimento flexible perteneciente a la PS4

Fuente: Adaptación personal

2.1.5 Diseño Geométrico

Una vez definidos ambos tipos de pavimentos, otro punto importante en la realización de la PS4 fue su diseño geométrico, el cual es la parte más importante del proyecto dado que establece los factores para la construcción de la autopista, como:

- Velocidades a tener en cuenta para el diseño.

- Los efectos operacionales de la geometría, especialmente los vinculados con la seguridad, estética y armonía de la solución.
- Tamaño de los vehículos.
- Tamaño de la calzada y de la berma lateral.

Otros factores para la realización de la PS4, en donde los carriles y el “sobre ancho”, también denominado “arcén” en otros países, fueron diseñados a partir de la clasificación de obras viales de acuerdo a la demanda vehicular. En este caso, la PS4 está catalogada como una autopista de Primera Clase, ya que posee un Índice Medio Diario Anual (IMDA) mayor a 6 000 vehículos por día, un ancho mínimo de carril de 3.60 metros y un separador de la berma central de 6 metros (MTC, 2014). En la Tabla N°1 se puede observar la clasificación de las carreteras en el Perú, en base a la demanda.

Tabla N°1: Clasificación de carreteras en el Perú por demanda. Fuente: Adaptado del Manual de Carreteras, Diseño Geométrico 2014

Tipo de carretera	IMDA	Características
Autopistas de Primera Clase	IMDA > 6000 veh/día	Control total de accesos, separador central mínimo de 6m, ancho mínimo de carril 3.60m
Autopistas de Segunda Clase	4001 < IMDA < 6000 veh/día	Control parcial de accesos, separador central de 1m a 6m, ancho mínimo de carril 3.60m
Carreteras de Primera Clase	2001 < IMDA < 4000 veh/día	Calzada de 2 carriles, ancho mínimo de carril de 3.60m
Carreteras de Segunda Clase	400 < IMDA < 2000 veh/día	Calzada de 2 carriles, ancho mínimo de carril 3.60m
Carreteras de Tercera Clase:	IMDA < 400 veh/día	Calzada de 2 carriles, ancho mínimo de carril 3.00m
Trochas Carrosables	IMDA < 200 veh/día	Ancho mínimo de calzada de 4.00m

2.1.6 Metodología ISO 14040 y 14044 para la implementación del ACV

Una vez definida la línea base y los escenarios a elaborar en el ACV, se realizó su implementación a partir de la recolección de datos. Estos datos se basan en las principales etapas de la construcción de una autopista: extracción de materiales, producción de productos de construcción, proceso constructivo, mantenimiento y operación de la autopista. Para cada una de las etapas, se realizó el análisis a partir de los estándares ISO 14040 (2006a) e ISO 14044 (2006b), siendo cuatro las fases principales que serán utilizadas en esta investigación. Estas fases se pueden observar en la Figura N°7.

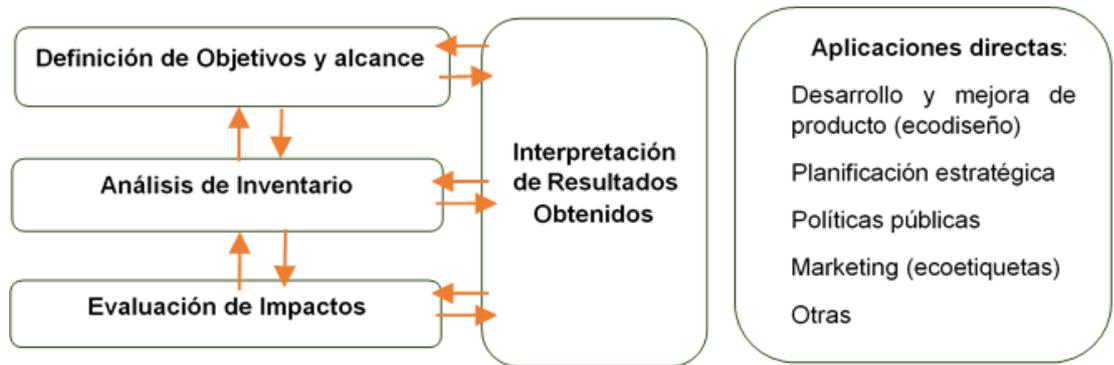


Figura 7: Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.

Fuente: Adaptado de la Normativa ISO 14044, 2006b

2.2 Definición de objetivos y alcance

El objetivo principal de la investigación fue analizar los resultados obtenidos a través de la aplicación del ACV a la PS4, considerando las consecuencias en el medio ambiente producidas durante tres de las etapas de desarrollo del proyecto: construcción, mantenimiento y operación de la vía. No se tomó en consideración la etapa de fin de ciclo de vida porque se presentaba bastante incertidumbre ya que se asume el tipo de procedimiento de reciclaje o de extracción empleado para la remoción de material y el tipo de condiciones tecnológicas de la nueva vía que vaya a ocupar el lugar de la predecesora.

La fase preliminar consistió en el planeamiento del enfoque y de los límites del estudio. El nivel de detalle y la profundidad en la recolección realizada en cada una de las etapas mencionadas anteriormente, dependió del tema y del uso que se pretendió darle al estudio (ISO, 2006b). El criterio de evaluación y enfoque de este proyecto fue el de contribuir con el monitoreo de las emisiones de GEIs, con el fin de proponer acciones de mejora y escenarios alternativos. Asimismo, también se analizaron otras dimensiones ambientales para dar un resultado holístico.

El destinatario previsto, a quien se le comunicarán los resultados del estudio, es la empresa concesionaria, Rutas de Lima. Los resultados también son de utilidad para la comunidad científica peruana de ACV y para las autoridades que estén relacionadas con el control de obras viales y transportes en el Perú.

Se tuvieron en cuenta para el proyecto las siguientes características de la carretera: pavimento asfáltico, pavimento rígido en una sección de cobro de peaje, iluminación, señalización (vertical y horizontal), obras de arte y demás componentes significativos. No se valoraron los elementos de los que no se tuvo buena calidad de datos, por ser parte de la concesión antigua, los mismos que no estuvieron dentro de

los límites de la investigación como puentes peatonales, ingresos y accesos a la autopista, así como aquellos materiales que por su peso, no son significativos con respecto al peso total de los materiales utilizados en el proyecto. Adicionalmente, no se consideraron los materiales de bajo valor contaminante.

La unidad funcional se basa en proporcionar una referencia a partir de la cual sean matemáticamente normalizados todos los datos de entrada y salida del sistema de producción. Por lo tanto, la unidad funcional será la unidad de referencia para todas las entradas y salidas del sistema (Aranda et al., 2006). Dado que la unidad funcional depende del tipo de estudio a realizar, en este caso se fijó como la construcción de 1 km de carretera en un año de operación.

Los datos y resultados obtenidos a lo largo de la investigación, fueron contrastados con normas y datos presentados en la literatura por diversos autores. Se verificó que en cada etapa del proyecto se obtuviesen respuestas teóricamente posibles, puesto que en caso se hubiese reconocido algún error o incoherencia en los resultados, se hubiese vuelto a realizar el estudio, de modo que se obtengan al final resultados correctos (ISO, 2006b).

Por esta razón, fue una prioridad reducir los límites del sistema en evaluación a un nivel conveniente y con un alcance moderado, para poder realizar la investigación de una forma específica y enfocada en los objetivos primarios y secundarios. Los límites del sistema se dividieron en la ecósfera y la tecnósfera.

Ecósfera: Ecosistema planetario, formado por la atmósfera, la geósfera, la hidrósfera y la biósfera. Se consideran parte de la ecósfera aquellas entradas provenientes de la propia naturaleza y las salidas que van directo hacia la atmósfera, las aguas oceánicas, las aguas terrestres o el suelo.

Tecnósfera: Es el componente de la tierra formado por todos los productos generados por el ser humano, siendo en esta investigación, las entradas (combustibles y energía utilizada) y las salidas (propio producto o proyecto que consumió las materias primas) que ya tuvieron un proceso previo por parte de actividades humanas. En la investigación realizada, los límites abarcaron la obtención de materiales, el proceso constructivo de la autopista, el transporte y abastecimiento de materiales, el consumo energético a lo largo de las tres sub-etapas analizadas, mantenimiento y uso de la vía, así como la liberación de los contaminantes emitidos en el proceso del ciclo de vida de la infraestructura vial a desarrollar. Se presentan las limitaciones del sistema en la Figura N°8.

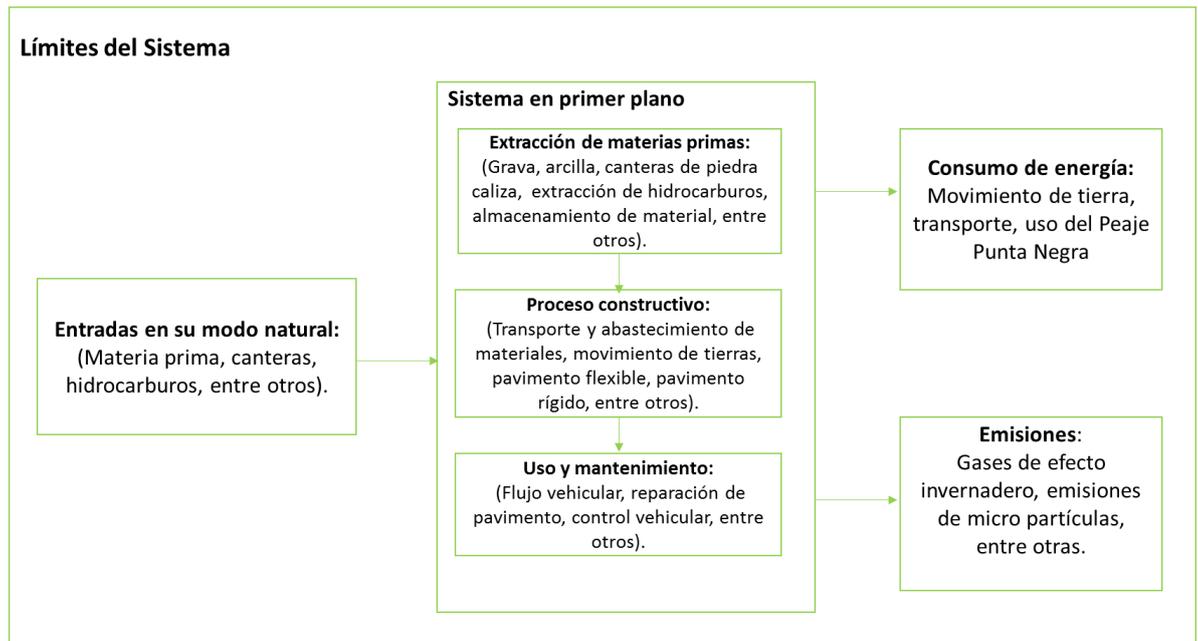


Figura 8: Límites del Sistema.

Fuente: Adaptación Personal

El límite del sistema estudiado incluyó los siguientes procesos para su evaluación:

- Obtención de materias primas para su construcción y mantenimiento.
- Proceso constructivo.
- Transporte y abastecimiento de materiales.
- Consumo energético (quema de combustibles fósiles y consumo eléctrico).
- Liberación de contaminantes en el ciclo de vida.

Con respecto a la limitación de los pavimentos analizados en la investigación:

Pavimento asfáltico:

A lo largo del recorrido de 22.429 km de asfalto, se tomaron en cuenta los siguientes elementos: la trayectoria de la autopista (asfalto) y las obras de arte que sirven como señalización de seguridad. Sin embargo, no se consideraron elementos de la infraestructura como las entradas y salidas a la autopista, puentes peatonales y vehiculares, ni las obras de arte adyacentes como los paraderos públicos, veredas y sardineles que se presentaron en el recorrido de la PS4.

Pavimento rígido:

El pavimento rígido se ubica únicamente en la zona del Peaje de Punta Negra, enfocándose el estudio en la losa de pavimento rígido construido, la construcción de las isletas (estructuras de protección de las casetas de peaje), las marquesinas (estructuras metálicas) y las obras de arte que se encontraron en el peaje como alumbrado eléctrico (postes de luz) y el cableado utilizado en la distribución de

energía para el funcionamiento del Peaje Punta Negra. Por otro lado, los elementos que no se tomaron en cuenta fueron: buzones eléctricos, zanjas, sardineles, pase de motos, oficinas de administración y recaudación del peaje, señalización horizontal y vertical, entre otras obras de arte que no influyeron de forma significativa en esta investigación.

Los elementos no seleccionados no se consideraron porque el tiempo y el costo para el estudio es reducido y limitado. Asimismo, la mayoría de estos datos no inventariados dentro de los límites del sistema son de procedencia de la concesión anterior por lo que no se pudo tener facilidad de acceso a los datos específicos.

2.3 Adquisición de datos

Con respecto a la recolección de datos, en base a los alcances y límites previamente mencionados, se recolectaron los que fueron necesarios para el estudio, cumpliendo con la cobertura temporal y geográfica que ameritó esta investigación. La recolección de datos se dividió en tres etapas: construcción, mantenimiento y uso/operación de la vía, y se definió por pavimentos elaborados (pavimento flexible y pavimento rígido).

La recolección de datos se obtuvo a partir de planos del Peaje de Punta Negra. En este sentido, se realizaron los metrados para obtener la cuantificación del material utilizado, se accedió al diseño del pavimento asfáltico nuevo y al programa de mantenimiento periódico y rutinario. Asimismo, se realizaron entrevistas estructuradas a ingenieros responsables y expertos en el área de pavimentos y diseño de proyectos, ingenieros de producción con alta experiencia y especialistas en construcción de carreteras. Se ejecutaron mediciones en campo y del material colocado in situ en la PS4 y de obras con similares diseños y procesos constructivos como el Peaje Espejo Chillón en la Panamericana Norte (PN) y el Peaje San Pedro en la P. También se obtuvo información del tránsito vehicular para algunos meses del año de estudio (2015), a partir del uso de aforadores (más adelante se detallan cuales).

Finalmente, se pudo concluir que la información obtenida en campo y brindada por la empresa fue de alta calidad. La distribución de datos se dividió en datos cuantitativos y cualitativos:

Datos cuantitativos:

- Entradas de energía, materia prima e *inputs* secundarios.
- Emisiones al aire, agua y suelo.
- Información para asignación de cargas ambientales.

- Información sobre tipo de transporte, distancia y rutas.

Datos cualitativos:

- Descripciones de tecnologías del proceso.
- Cómo y cuándo se tomaron las mediciones de emisiones.
- Escala temporal de los datos.
- Ubicación geográfica del proceso.

Dada la gran cantidad de datos que se requirieron, se optó por dividir los datos a utilizar en primarios y secundarios.

Datos primarios: Estos datos fueron brindados por la empresa Rutas de Lima, previo acuerdo con la concesión y sus representantes del área de mantenimiento y obras (ver Tabla N°2).

Tabla N°2: Información Primaria brindada por la empresa Rutas de Lima. Fuente: Adaptación personal

Información Primaria	
Tránsito Vehicular	Información de tipo de carros (automóviles, camiones, número de ejes, etc.)
	Cantidad de carros en un determinado tiempo(día, mes, año)
	Velocidades promedio
Información de la propia construcción	Material utilizado
	Cantidad de materiales utilizados
	Maquinaria
	Promedio de horas utilizadas
	Tipo de mantenimiento
	Cada cuanto tiempo se realiza el mantenimiento y como
Consumo eléctrico	Consumo eléctrico del Peaje Punta Negra (diario, mensual, anual) de acuerdo a la información que se disponga
	Iluminación en el tramo de la PS4

Las limitaciones con respecto a la información utilizada fueron:

- Temporalidad de los datos. Se fijó un período anual determinado: año 2015.
- Para la información brindada del mantenimiento de la vía, se diferenciará en dos tipos de mantenimiento de acuerdo al periodo cronológico en el que se encuentre: rutinario o periódico.

Datos secundarios

Los datos secundarios fueron aquellos obtenidos a partir de la bibliografía utilizada para el estudio y modelado de datos. Estos incluyen libros, revistas locales,

sitios web oficiales, artículos científicos, manuales de operación de los programas de computación a utilizar, entre otros.

Con respecto al modelado, este se realizó a partir de la metodología propuesta por el *Environmental Protection Agency* (EPA), con el fin de poder obtener resultados para nuestra unidad funcional en la categoría de impacto de la emisión de partículas al medio ambiente (EPA, 2016).

Sistemas *foreground* y *background*

A los datos primarios y secundarios mencionados anteriormente se les consideró *foreground system* (sistema en primer plano), dado que es el sistema frontal que se tiene en la investigación; la parte del inventario más directa. Por otro lado, el *background system* (sistema en segundo plano) está constituido por aquellos datos del inventario que no se obtuvieron en campo o no los poseía la empresa Rutas de Lima, pertenecientes directamente al ciclo de vida de los materiales y el consumo de energía a lo largo de las tres fases del ciclo de vida del proyecto. Estos fueron obtenidos a partir del uso de base de datos internacionales, mayoritariamente del uso de la base de datos Ecoinvent®, versión 3.2.

A partir de esta base de datos se obtuvieron aquellos inventarios que no se pudieron obtener del propio escenario base, así como información de obras de características similares en distintas partes del mundo o para datos medios globales. Complementando ambos tipos de datos, se obtuvo una investigación más completa, y así la calidad y cantidad de los datos fue significativa, posibilitando una mayor calidad en los resultados finales.

Para la validación de los datos, se evaluó la validez y calidad de estos a partir de:

- Comparación con otras fuentes de datos.
- Balances de energía o masa.
- Cumplimiento de cada uno de los requisitos de la calidad de los datos definidos anteriormente.

2.4. Inventario de Ciclo de Vida

Finalizada la primera etapa, la segunda fase fue en base al desarrollo del inventario del ciclo de vida (ICV). Este proceso consistió en la recolección de datos y cálculos para cuantificar las aportaciones y salidas de cada uno de los productos. A medida que se desarrolló el proyecto, se mejoró la calidad de información en los inventarios, porque se encontraron más y mejores fuentes de información.

Se recopilaron datos para el ICV a partir de fuentes primarias y secundarias. Como fuente primaria, se utilizó la información mencionada en el capítulo 2.3. Por otro lado, se empleó como fuente secundaria la base de datos Ecoinvent®, versión 3.2, desarrollada por *Swiss Center for life Cycle Inventories*. Esta cuenta con una gran cantidad de datos de los últimos 20 años de experiencias de ICV alrededor del mundo y más de 12 800 procesos unitarios en áreas como energía, agricultura, transporte, biocombustibles, entre otros (ECOINVENT, 2017).

2.4.1 Cálculo de emisiones de material particulado

Para esta investigación se realizó el modelado de emisiones de partículas, dada la importancia de este factor en la construcción y operación de una carretera, considerando tres factores (Cowherd y Englehart, 1985):

- Emisión de partículas por la re-suspensión de la superficie de la carretera que se emite al medio ambiente a medida que transitan los vehículos por el pavimento.
- Emisión de partículas producida por el desgaste de los frenos de los vehículos en tránsito.
- Emisión de partículas producida por el desgaste de los neumáticos de los vehículos que transitan por la PS4, originada por la fricción y abrasión que se presenta en el contacto de los neumáticos con el pavimento (ya sea rígido o flexible). Factor importante dado la cantidad de vehículos tanto privados, como de transporte público y de carga que transitan constantemente por la vía.

Los principales factores con respecto a la cantidad de emisión de partículas para una vía pavimentada son la velocidad media de los vehículos, el tráfico diario promedio y el número de carriles que posee la autopista o carretera a lo largo de su recorrido (EPA, 1993).

Para los tres tipos de emisiones se utilizó el informe AP-42, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Dicho informe considera la compilación principal de factores de emisión de la EPA (EPA, 2016). Para el caso de la primera emisión (re-suspensión), este informe propone la cuantificación de las emisiones de partículas en un camino pavimentado en condiciones de estado seco a partir de la versión de cuantificación EPAMOVES2010. Esta cuantificación evita considerar las emisiones relacionadas con el desgaste de frenos y neumáticos para que no se produzca un

doble conteo de emisiones. Utilizando datos empíricos se produce la siguiente fórmula (EPA, 2010):

$$E = k * (sL)^{0.91} * (W)^{1.02}$$

Donde:

- E = Factor de emisión de partícula (varía de acuerdo a la unidad de k).
- k = Factor multiplicador según tamaño de partículas.
- sL = Superficie de limo en el terreno (en gramos por metro cuadrado).
- W = Peso promedio de los vehículos que pasan por la autopista.

El factor k, tamaño de la partícula, se puede observar en la Tabla N°3 adaptada de la EPA que varía de acuerdo al tamaño de la partícula y de las unidades a trabajar (EPA, 1995). En el caso de esta investigación, se trabajó con *Particulate Matter* (PM) 2.5 y 10 porque son las partículas que se producen durante el transporte de vehículos de distintos tamaños en las obras viales según lo que indica el AP-42. Estas son partículas suspendidas presentes en la atmosfera, cuyo diámetro aerodinámico es igual o inferior a 10 micrómetros (PM10) o igual o inferior a 2.5 micrómetros (PM2.5), que es la fracción respirable más pequeña. Ambas producen efectos nocivos para la salud humana (a menos diámetro, más dañino para la salud), por su capacidad de penetración en las vías respiratorias produciendo enfermedades cardiovasculares (Linares y Díaz, 2008).

Por comodidad se trabajó con la unidad g/VKT (*grams/ Vehicule Kilometer Traveled*), puesto que esta investigación se desarrolló en base al sistema internacional de unidades (SI) y sus unidades derivadas.

Tabla N°3: Factor Multiplicador K, según tamaño de partículas. Fuente: Adaptado de Environmental Protection Agency (1995). *Compliance of Air Pollutant Emission Factors*.

Rango de tamaño	Factor multiplicador K		
	g/ VKT	g/ VMT	lb/ VMT
PM- 2.5	0.15	0.25	0.00054
PM- 10	0.62	1	0.0022
PM -15	0.77	1.23	0.0027
PM- 30	3.32	5.24	0.011

En cuanto al valor de sL, la EPA sugiere valores típicos que dependen de la cantidad de vehículos que circulan diariamente por la vía a analizar, para el caso de

la PS4, esta posee una cantidad de vehículos diarios superior a 10 000 vehículos (16 927 aproximadamente), por lo que se usó el valor recomendado por la EPA para este tipo de vías de alto flujo, el cual es 0.03 gramos por metro cuadrado de superficie de limos en el terreno (sL) (EPA, 2002).

Con respecto al peso (W) de los vehículos que transitan en la PS4, se usó como referencia lo citado por el Reglamento Nacional de Vehículos, en donde se afirma que los pesos promedios de los vehículos a estudiar son los siguientes: autobuses (25 toneladas), vehículos de carga pesada (32 toneladas) y vehículos livianos (1.4 toneladas), según datos obtenidos del Ministerio de Transportes (MTC, 2003). La Tabla N°4 muestra la cantidad de vehículos en un año por tipología, así como el peso medio asumido en cada uno de los tres tipos de vehículos.

Tabla N°4: Peso de los vehículos según su tipo. Fuente: Adaptación personal

Tipo de Vehículo	Número de Vehículos	Peso (ton)
Livianos	4826995	1.4
Públicos	806259	25
Carga Pesada	544787	32

A partir de cálculos se obtuvo el peso promedio en base al número de vehículos, el cual fue igual a $W = 7.3$ toneladas americanas. Debido a que la unidad de peso utilizada en la fórmula estuvo en base a la tonelada americana, equivalente a 0.907 toneladas métricas, se hizo la conversión al SI. Por lo tanto, el valor de peso promedio anual utilizado fue igual a $W = 8$ toneladas métricas.

Una vez que se realizó el cambio de unidad, para una distancia total de recorrido de 22.429 km, utilizando la fórmula para hallar el factor de emisión producido por la re-suspensión de una partícula, se pueden observar los resultados en la Tabla N°5:

Tabla N°5: Cantidad de Emisión Anual por re-suspensión de material particulado. Fuente: Adaptación personal.

Tipo de Partícula	Factor Emisión Anual E (Ton)
PM2.5	7.13
PM10	29.47

A parte de la emisión de material particulado producido por la re-suspensión de partículas en la autopista, se produce la emisión de partículas por el desgaste de frenos y neumáticos. Estas son emisiones sin escape a comparación de las

emisiones producidas por los procesos de combustión del combustible, aceite y entre otras partículas que salen del tubo de escape. Las emisiones producidas por los frenos y el desgaste de los neumáticos se producen por el propio “desgaste” del material producido por la abrasión, corrosión y turbulencia, los cuales producen las partículas que quedan suspendidas en el aire (Harrison et al., 2012).

Con respecto al desgaste de los frenos, este se basa en la masa del material perdido en las pastillas de los frenos de los vehículos convencionales (freno de disco o freno de tambor). Ambos tipos de frenos utilizan procesos de fricción para resistir el movimiento inercial del vehículo produciendo desgaste y, por consiguiente, la emisión de partículas contaminantes PM2.5 y PM10. Esta cantidad de masa depende del tipo de vehículo. Los camiones de carga pesada y los vehículos de transporte público producen mayor cantidad de emisiones a comparación de los vehículos livianos, dado que al ser de mayor peso requieren frenos más grandes y por lo tanto, mayor liberación de partículas.

En la literatura se han realizado modelados y pruebas para poder cuantificar la cantidad de material particulado emitido por cada tipo de vehículo que transite en una autopista. En este estudio, se utilizaron los valores dados por el autor Garg (2000), debido a que a diferencia de los demás autores, se diferenciaron los resultados entre vehículos livianos y vehículos de carga pesada. Además, esta publicación es de las más recientes, por lo que se pudo mantener la calidad de la información, la cual se puede observar en la Tabla N°6 (Garg, 2000).

Tabla N°6: Factor de Emisión, según el tipo de vehículo y kilómetro recorrido. Fuente: Adaptado de *Environmental Protection Agency (2014). Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014.*

Tipo de Vehículo	PM2.5 (mg/km)	PM10 (mg/km)
Vehículo Liviano	3.4	8.9
Vehículo Pesado	4.6	12.1

En base a la longitud total del tramo de autopista analizado (22.429 km) y teniendo en cuenta la cantidad de vehículos registrada en la Tabla N°4, se pueden observar en la Tabla N°7 los resultados obtenidos del sumatorio de todos los tipos de vehículos.

Tabla N°7: Cantidad de Emisión Anual producida por el desgaste de los frenos.
Fuente: Adaptación personal

Tipo de Partícula	Emisión Anual (Kg)
PM2.5	637.79
PM10	864.68

Finalmente, con respecto a la emisión producida por el desgaste de los neumáticos, esta varía de acuerdo al tamaño de los vehículos, siendo el contacto con la superficie la causa que genera el desgaste. La fricción hace que el material del neumático se deteriore, liberando partículas que quedan suspendidas en el aire. Cabe mencionar que la rugosidad de la superficie afecta en la tasa de desgaste en un factor de 2 a 3 (EPA, 2014).

Además de la rugosidad de la superficie, el desgaste de los neumáticos depende también de los factores de actividad como la ruta, el estilo del manejo del conductor y la estación del año cuando se transita por la vía. En relación a la ruta y el estilo de manejo, acciones como un fuerte frenado o acelerar constantemente generan un mayor desgaste en los neumáticos dado que la aceleración determina la cantidad de fuerzas aplicadas en los neumáticos. Adicionalmente, con respecto al efecto de la estación del año, la temperatura del aire, la humedad y el contacto con el agua son los factores que determinan en cuánto tiempo se desgastará la superficie de los neumáticos. Por ejemplo, el desgaste de los neumáticos en superficies húmedas es menor frente a condiciones de superficie seca, dado que la fricción y la abrasión del neumático con la superficie es menor (Maître, 1998).

El último factor importante con respecto al desgaste de los neumáticos en contacto con la superficie de la autopista es la tipología del vehículo. El peso, la suspensión, la geometría de la dirección, el material del freno y el diseño del vehículo son los principales factores. Sin embargo, las características de los neumáticos (principalmente las físicas) influyen en su desgaste como la forma (determinada por su rigidez), el volumen de caucho y el tipo de caucho utilizado (Bennett y Greenwood, 2001).

Según la bibliografía revisada en esta investigación, el desgaste de los neumáticos se ha cuantificado a partir de la duración del neumático, en base a la distancia en kilómetros recorrida, el peso inicial y el estado de la superficie del neumático. Es importante precisar que el desgaste más significativo se va a dar en los vehículos de mayor peso y tamaño, dado que los neumáticos reciben una mayor cantidad de fuerzas. Para su modelado, se usaron los valores estimados por la EPA,

dado que el modelado realizado para hallar la cantidad de material particulado emitido al aire está actualizado. Asimismo, dicha guía se basó en distintos autores de distintas bibliografías y metodologías actuales, para poder cuantificar la cantidad de material particulado (PM2.5 y PM10) para cada tipo de vehículo. La Tabla N°8 presenta los factores de emisión de desgaste de neumáticos brindados por la EPA (EPA, 2014).

Tabla N°8: Factores de emisión según el tipo de vehículo y kilómetro recorrido. Fuente: Adaptado de *Environmental Protection Agency (2014). Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014*

Tipo de Vehículo	PM2.5 (mg/km)	PM10 (mg/km)
Vehículo de Pasajeros	0.93	6.09
Vehículo de Carga Pesada	1.93	12.80
Vehículo Público Interurbano	2.73	18.21

Se procedió a realizar los cálculos para la cuantificación de la cantidad de emisión de material particulado PM2.5 y PM10 generado, en donde la sumatoria de las emisiones totales de los tres tipos de vehículos representó los resultados apreciados en la Tabla N°9.

Tabla N°9: Cantidad de emisión anual producida por el desgaste de los neumáticos. Fuente: Adaptación personal

Tipo de Partícula	Emisión Anual (Kg)
PM2.5	173.89
PM10	1144.91

2.4.2 Modelado del Inventario de Ciclo de Vida

Una vez finalizada la cuantificación de la emisión de material particulado a la atmósfera, se procedió a la realización del ICV del proyecto. Para iniciar con este, primero se optó por realizar un cuadro conceptual en donde se especificaron las fases analizadas en esta investigación: construcción, mantenimiento y el uso (flujo vehicular).

La etapa de construcción se dividió en los dos pavimentos analizados, que son el Peaje de Punta Negra y el tramo de carpeta asfáltica de la PS4. Se utilizó para la elaboración del inventario toda la información especificada en el capítulo 2.3 y todos los componentes de la biósfera y tecnósfera especificados en la Figura 8. Adicionalmente, en esta etapa se añadió el mantenimiento periódico de la vía, dado que este mantenimiento se realizó en el periodo de tiempo enfocado para esta

investigación, por lo que se consideró como parte de la etapa de construcción de la vía.

Para el flujo vehicular se utilizó la información brindada por la empresa mencionada en el capítulo 2.3., la cual consideró la cantidad exacta de vehículos que transitaron por la vía en el año 2015 (meses de marzo a agosto). El tránsito para los otros 6 meses del año se modeló a partir de aproximaciones para cada temporada del año.

Finalmente, para el mantenimiento, se tomó en cuenta el consumo eléctrico generado por la estación de peaje y el mantenimiento de la vía. Con respecto al consumo eléctrico, esta información fue brindada por la empresa Rutas de Lima, la cual se basó en el consumo eléctrico generado por el Peaje Punta Negra. Esta información se obtuvo a partir de las facturas de consumo eléctrico mensual de la estación de cobros de Punta Negra. La calidad de información es importante, dado que se pudo obtener de forma directa la cantidad de consumo energético para los meses de setiembre a diciembre del año 2015. Para poder complementar la cantidad de consumo eléctrico se utilizó la información del año 2016, puesto que el consumo eléctrico no varía significativamente entre un año y otro, por lo que se optó por utilizar esta información para completar los datos. Esta suposición se considera una limitación, dado que al asumir la cantidad de energía de otro año, se genera incertidumbre con respecto a los datos originales del 2015.

Para el mantenimiento de la calzada, se tuvieron en cuenta una serie de consideraciones que se mencionan a continuación. En el contrato firmado por la empresa Rutas de Lima se le denomina al mantenimiento vial como el conjunto de actividades que se realizan para preservar en buen estado las condiciones físicas de los diferentes elementos que constituyen la vía, y de esta manera, garantizar la calidad de la infraestructura. Las actividades de mantenimiento se clasifican, usualmente, por la frecuencia con la cual se repiten o monitorean:

- **Mantenimiento rutinario:** conjunto de actividades de evaluación y acción que se ejecutan frecuente y permanentemente, constituyéndose en acciones que tienen como finalidad principal la preservación de todos los elementos viales con la mínima cantidad de alteraciones o daños y, en lo posible, conservando las condiciones que tenían después de la construcción o de la rehabilitación, procurando el normal deterioro de la vida útil. Para esta investigación, se pudo obtener la información acerca del mantenimiento rutinario que realiza la empresa, el cual se realiza anualmente, en donde se

incluye: reparación de baches en el asfalto, imperfecciones en la vía, colocación de pintura, entre otros trabajos (Rutas de Lima S.A.C., 2012). Este tipo de mantenimiento es el que se consideró para esta etapa de la investigación.

- **Mantenimiento periódico:** El mantenimiento periódico es el recapeo y colocado de asfalto nuevo (capa de 4 cm) que se coloca en tres intervalos de tiempo a lo largo de la concesión: 2014-2015, 2021-2022 y 2030-2031 (Rutas de Lima S.A.C., 2012). Este tipo de mantenimiento no se consideró en esta etapa de la investigación, habiéndose considerado en la etapa de construcción por las razones explicadas anteriormente.

Los datos sobre la extracción de materias primas se obtuvo de la base de datos Ecoinvent®, versión 3.2., puesto que este tipo de información va más allá de los datos que se podrían obtener en esta investigación. Con respecto al inventario del ciclo de vida, en la Figura 9, se puede observar la división del inventario en subsistemas.

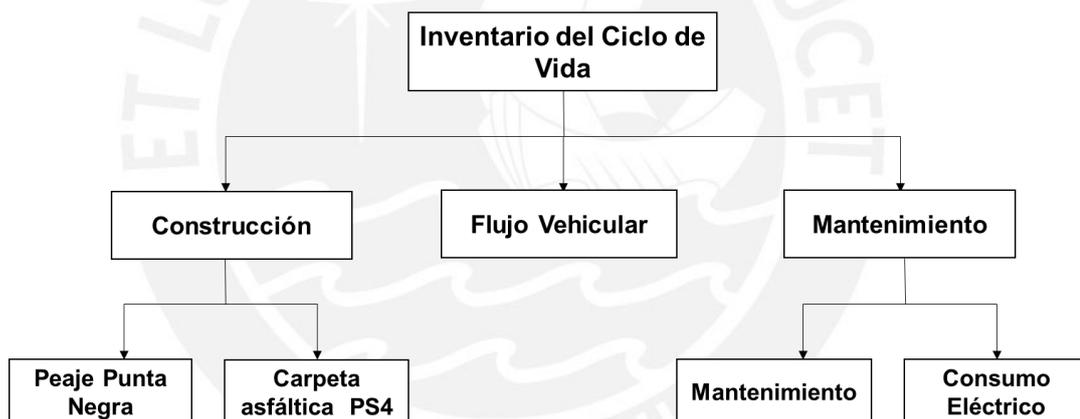


Figura 9: División del inventario de Ciclo de Vida en subsistemas.

Fuente: Adaptación personal

Construcción:

Escenario carpeta asfáltica PS4

En las Tablas N°10-14 se presentan los inventarios utilizados para la construcción del tramo analizado. Estos inventarios se han realizado en base a la unidad funcional de referencia utilizada en esta investigación (1 km de carretera por año). Para la realización de estos inventarios se tomó en consideración la cantidad de años de vida útil de cada elemento utilizado en el proyecto. Dicha información se

obtuvo a partir de fuentes bibliográficas, archivos e investigación en la web, así como información presentada por la empresa concesionaria.

Inventario de la carpeta asfáltica

En la Tabla N°10 se presentan los materiales utilizados para la construcción de la carpeta asfáltica en la PS4 en base a la unidad funcional. Para la señalización horizontal y el pavimento asfáltico nuevo, en base a lo comunicado por Rutas de Lima, se tomó como cantidad de vida útil: 6 meses y 6 años, respectivamente. Para la señalización horizontal (pintura) se consideró ese tiempo para su funcionamiento óptimo y cuando termine ese período se procederá a colocar otra capa. Para el pavimento nuevo, se consideraron 6 años, puesto que con cada mantenimiento periódico se realiza un recapeo para luego colocar una nueva capa de asfalto (Rutas de Lima, 2016).

Tabla N°10: Inventario materiales carpeta asfáltica PS4.

Fuente: Adaptación personal.

Materiales/Combustible	Cantidad	Unidad
Señalización horizontal	122441	m
Tachas retroreflectivas	592	p
Pavimento nuevo	79138	m2
Guardavías vigas	606	p
Postes guardavías	808	p
Captafaros	3109	p
Maquinaria asfalto (pavimento antiguo)	0.02	p
Base granular autopista	0.02	p
Pavimento antiguo	9496.6	m2
Maquinaria asfalto (pavimento nuevo)	0.2	p

Con respecto a los demás materiales, la información utilizada para evaluar la vida útil fue obtenida a partir de búsqueda bibliográfica para poder modelar los elementos con un tiempo de vida de acuerdo al período que se le otorga a los elementos en el mercado. Se les asignó una vida útil a los siguientes elementos: tachas retroreflectivas, guardavías vigas y postes, captafaros, base granular de la autopista y el pavimento antiguo. Para las tachas retroreflectivas el tiempo de vida útil promedio es de 12 años dado que este depende de varias variables como el volumen de tráfico, el tipo de vehículos que transitan y la cantidad de material abrasivo presente (Signo Vial, 2016). En el caso de las guardavías, tanto postes como vigas tienen una vida útil de 15 años, dependiendo de si hay impacto por parte de los

vehículos contra la estructura puesto que estos absorben la energía cinética en los impactos y resisten los daños causados (Prodac, 2016). Los captafaros tienen un rango de vida útil de 3-5 años, por lo que se consideró una vida útil de 4 años como promedio, ya que estos van empotrados en los guardavías (SEBAsl, 2016). Para la base granular y el pavimento antiguo se consideró una vida útil de 50 años dado que para este tipo de pavimentos de alto flujo vehicular, la calidad, el estado de la superficie de rodadura y las capas inferiores deben de permanecer en buen estado para un tiempo prolongado debido a la extensión de la vía (Leiva, 2005).

Inventario de la maquinaria utilizada en la construcción de la carpeta asfáltica

En las Tablas N°11 y N°12 se visualiza el inventario realizado para la maquinaria utilizada en la construcción de la carpeta asfáltica en la PS4. Esta maquinaria varía de acuerdo a cada una de las actividades realizadas a lo largo de la construcción del proyecto. Por otro lado, a parte de la cantidad de horas trabajadas y la cantidad de kilogramo de diésel consumido, estas maquinarias tienen una vida útil que varía dependiendo del tipo de máquina.

Para el caso de la retroexcavadora y el rodillo compactador, la vida útil es de 5 años o 10 000 horas de uso cada uno. Esto se debe a que ambas maquinarias se encuentran en constante funcionamiento durante la construcción de la autopista, puesto que se encargan de una gran parte del movimiento de tierra de la obra. Por otro lado, las que funcionan con una cisterna, como los camiones cisternas transportadores de agua, las regadoras de asfalto, la maquinaria de riego de liga, imprimadora asfáltica y la fresadora de asfalto, tienen una vida útil de 6 años o 6 900 horas de uso, ya que este tipo de maquinaria depende de la cantidad de material que se vaya a colocar, que en este caso puede ser material bituminoso o agua, y funcionan en ciertos periodos específicos durante la construcción del pavimento. La maquinaria que más tiempo de vida útil posee es la que transporta los materiales, la cual es conocida en el Perú como "Volquete". Estos funcionan durante el desarrollo de toda la obra debido a que se encargan del traslado del material colocado o removido en el proyecto. Los volquetes tienen una vida útil aproximada de 9 años o 125 000 horas, dado que tienen una buena capacidad de transporte de carga y están diseñados para trasladarse grandes distancias durante largos periodos de tiempo.

Para el cómputo de los valores que se muestran en las Tablas N°11 y N°12 se realizó la conversión de unidades de 1 galón a kg, considerando una densidad de 890 kg/m³ para poder hallar la cantidad de kg consumidos por cada máquina durante todo el proyecto. Para hallar el rendimiento se utilizaron datos de la bibliografía,

rendimientos obtenidos en obras viales parecidas y el rendimiento por maquinaria que reporta el expediente técnico. Una vez realizada la cuantificación de la cantidad de horas trabajadas y el rendimiento de cada una de las maquinarias se pudo obtener el inventario. El inventario de la maquinaria detalla la cantidad de kg utilizados en promedio para el proyecto de la autopista. Este se dividió en 2: inventario de la maquinaria del pavimento antiguo, que incluye la base y sub-base granular y la capa asfáltica de 8cm en la Tabla N°11, y el inventario de maquinaria del pavimento nuevo, que se encuentra por encima del pavimento antiguo, que solo consta de la capa asfáltica de 4cm en la Tabla N°12.

Tabla N°11: Inventario maquinaria construcción pavimento antiguo

Fuente: Adaptación personal

Materiales/Combustibles	Cálculos	Cantidad	Unidad	Maquinaria
Diésel B5	3.6*22839*Galón*densidad	277	t	Rodillo compactador
Diésel B5	6077*3.9*Galón*densidad	80	t	Retroexcavadora
Diésel B5	30952*8.79*Galón*densidad	915	t	Volquete
Diésel B5	714*3.3*Galón*densidad	8	t	Camión Cisterna
Diésel B5	1968*3.3*Galón*densidad	22	t	Regadoras de asfalto
Diésel B5	3.3*Galón*densidad*422	5	t	Imprimadora de asfalto

Tabla N°12: Inventario maquinaria construcción pavimento nuevo

Fuente: Adaptación personal

Materiales/Combustibles	Cálculos	Cantidad	Unidad	Maquinaria
Diésel B5	984*3.3*Galón*densidad	11	t	Regadoras de asfalto
Diésel B5	282*3.3*Galón*densidad	3	t	Riego de liga
Diésel B5	609*3.3*Galón*densidad	7	t	Fresadora de pavimento

Inventario para la construcción del pavimento nuevo y el antiguo

Las Tablas N° 13 y N°14 muestran el inventario del diseño de mezcla de cada uno de los pavimentos construidos. Por un lado, el pavimento nuevo está constituido de una capa de 4 cm que se retira periódicamente cada 6 años por la empresa concesionaria y se coloca un nuevo pavimento para mantener la calidad de la superficie y de la vía, para que así los vehículos transiten sin problema.

Para ambos pavimentos el área es la misma: 474 830 m². Para efectos de esta investigación se consideró para ambos inventarios el diseño de la mezcla utilizada para la capa superior, tal como lo reportó la empresa concesionaria, dado que no se pudo lograr obtener el tipo de mezcla utilizado en la colocación del pavimento antiguo. Esta situación influye en los resultados finales puesto que el diseño asfáltico es distinto al momento de construirse el proyecto en comparación a

la mezcla utilizada en la actualidad, siendo la actual de mayor calidad y con una mejorada distribución de los componentes de la mezcla asfáltica.

Para este caso, el tiempo de vida se explicó anteriormente en la Tabla N°10, en donde el asfalto (material bituminoso) tiene un tiempo de vida útil igual a 6 años para el pavimento nuevo y 50 años para el pavimento antiguo. Aparte, para ambos pavimentos, el material granular, ya sea fino o grueso, tiene el mismo tiempo de vida útil que es igual a 50 años.

Tabla N°13: Inventario pavimento antiguo. Fuente: Adaptación personal.

Materiales/Combustibles	Cantidad	Unidad
Asfalto	4741	t
Grava	28300	t
Arena	31225	t

Tabla N°14: Inventario pavimento nuevo. Fuente: Adaptación personal.

Materiales/Combustibles	Cantidad	Unidad
Asfalto	2370	t
Grava	14150	t
Arena	15612	t

Escenario: Peaje Punta Negra

Las Tablas N°15-18 presentan los inventarios utilizados para la construcción del Peaje Punta Negra ubicado en el km 45+100 de la PS4. Para la realización de estos inventarios se tomó en consideración la cantidad de años de vida útil de cada elemento utilizado en el proyecto. Para la realización del inventario del peaje Punta Negra se tuvo acceso a los datos de los planos de construcción, por lo que se pudieron realizar mediciones *in situ* y hacer cálculos a partir del uso de los planos de la obra para poder obtener la cuantificación de todos los materiales utilizados para la construcción del peaje. Dicha información se complementó con fuentes bibliográficas, archivos, investigación en la web e información presentada por la empresa concesionaria.

Inventario Peaje Punta Negra

La Tabla N°15 muestra la tipología y cantidad de piezas usadas para la realización del inventario del peaje. Las Tablas N°15-18 presentan cada una de estas piezas con su propio inventario específico para describir cada uno de los elementos y materiales usados.

Tabla N°15: Inventario Peaje Punta Negra. Fuente: Adaptación personal.

Materiales/Combustibles	Cantidad	Unidad
Isletas	11	p
Marquesinas	11	p
Pavimento rígido	381.33	m ³
Maquinaria en el peaje	1	p
Sistema eléctrico	1	p

Inventario de las Marquesinas

Las marquesinas son las estructuras metálicas que componen la parte estructural de las estaciones de cobro en los peajes. En el caso del Peaje Punta Negra, se hallan un total de 11 marquesinas compuestas por los materiales observados en la Tabla N°16. Por un lado, se tiene la estructura metálica principal, la cual está hecha a partir de acero A-36 con un tiempo de vida útil igual a 60 años (Hernández, 2008).

Una vez colocada la estructura metálica, a esta se le colocan una serie de capas de pintura, las cuales son impermeabilizantes y de acabado. Con respecto a la pintura impermeabilizante es importante tener en cuenta que la estructura, al encontrarse en un territorio cercano a la costa, podría presentar problemas de corrosión. Por lo tanto, se colocan dos capas de pintura impermeabilizante con un determinado espesor para evitar que se produzca la corrosión y que el elemento cumpla con su vida útil de 60 años. Para esta investigación se asumió que la marquesina es un sistema único, por lo que para las capas de pintura se asumió un tiempo de vida útil igual al de las marquesinas. Finalmente, se puede observar en la Tabla N°16 la cantidad de material en kg de cada uno de los componentes de la marquesina.

Tabla N°16: Inventario marquesinas. Fuente: Adaptación personal

Materiales/ Combustibles	Cantidad	Unidad
Acero de baja aleación	6756	Kg
Acabado de poliuretano alifático brillante	8.56	Kg
Pintura Epoxi/ Amida multifuncional	4.39	Kg
Revestimiento de poliéster	1.92	Kg

Pavimento rígido:

En la Tabla N°17 se presentan los materiales utilizados para la construcción del pavimento rígido utilizado en la construcción del Peaje Punta Negra. Para el

inventario del pavimento rígido, dado que se tuvieron los planos originales del proyecto, se pudo cuantificar de forma directa la cantidad de concreto, acero, material granular y fibras de poliestireno que se utilizaron en su construcción. En el caso del concreto de resistencia igual a 350 kg/cm^2 , el pavimento rígido tiene una vida estimada de servicio en Lima de hasta 50 años, ya que su carga es transmitida a la subrasante por la fuerza estructural del pavimento como conjunto rígido, haciéndola más resistente, así como porque su mantenimiento es menor y más sencillo al realizarse un mantenimiento de limpieza o reparaciones mínimas en las aberturas de las juntas longitudinales y transversales (Sotil, 2014).

En la Tabla N°17 se observa la cantidad de acero utilizado en el pavimento rígido, tanto para la junta longitudinal como para la transversal, siendo los tipos de acero, corrugado y liso, respectivamente. La vida útil para ambos fue de 50 años.

Tabla N°17 Inventario pavimento rígido. Fuente: Adaptación personal

Materiales/ Combustibles	Cantidad	Unidad
Concreto 350 Kg/cm^2	381.33	m^3
Acero corrugado	282	Kg
Acero liso	408	Kg
Fibra de polipropileno	205	g
Base granular (grava) 1800 Kg/m^3	1206	t
Sub base granular (grava) 1800 Kg/m^3	905.4	t

Asimismo, se consideró la cantidad de polipropileno utilizado como aditivo para darle al concreto propiedades de flexibilidad y, finalmente, se cuantificó la cantidad de material granular utilizado para la base y sub-base colocada por debajo de la superficie de concreto.

Isletas:

Las isletas, mejor conocidas como estructuras de amortiguamiento de concreto de las casetas de cobro del peaje, son un total de 11 piezas para proteger a las 11 casetas. Son estructuras de concreto armado parecidas a un muro o estructura protectora frente a la colisión o impacto de los vehículos que transiten en la vía. Este elemento se cuantifica para un tiempo de vida útil igual a 50 años, puesto que revisando la bibliografía y estudios realizados por distintos autores, la vida útil promedio de una obra de concreto armado es de 50 años (Londoño, 2012). Este periodo se justifica en base a que el concreto armado tiene una gran resistencia a la compresión y porque mantiene su calidad (así se encuentre en contacto con el medio ambiente) por su composición química. Esta estructura es una pieza de fácil acceso,

lo que permite realizar mantenimientos periódicos asegurando el control del deterioro del elemento y la prolongación de su tiempo de vida útil (Londoño, 2012).

Para la cuantificación de los materiales de este elemento, se llevó a cabo el metrado de acero y concreto de cada una de las estructuras de concreto armado que la componen. Cada isleta está dividida en los siguientes elementos: zapata, pedestal, vigas de cimentación, muro y losa de isleta. Asimismo, una isleta también posee un relleno de poliestireno expandido dentro del muro para darle volumen a la estructura. En la Figura N°10 se puede ver la vista en planta de un muro de isleta. La Tabla N°18 muestra los datos de inventario de la isleta de concreto, cuantificado para cada uno de los elementos que la componen.

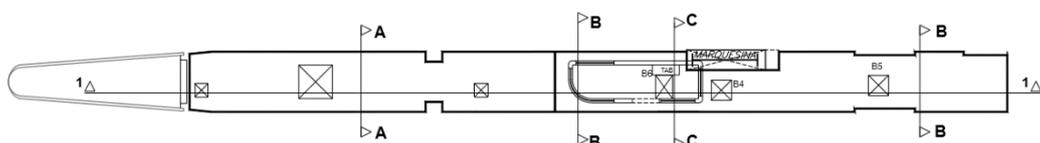


Figura 10: Vista en planta de una isleta de cobro

Fuente: Adaptado de Rutas de Lima

Tabla N°18: Inventario isletas. Fuente: Adaptación personal

Elemento	Materiales/ Combustibles	Cantidad	Unidad
Zapata	Concreto 310 kg/cm ²	11	m ³
Pedestal	Concreto 310 kg/cm ²	0.7	m ³
Vigas de Cimentación	Concreto 310 kg/cm ²	2	m ³
Muro de Isleta	Concreto 280 kg/cm ²	5	m ³
Losa de Isleta	Concreto 280 kg/cm ²	5.5	m ³
Zapata	Acero corrugado fy= 4200kg/cm ²	935	kg
Pedestal	Acero corrugado fy= 4200kg/cm ²	58	kg
Vigas de Cimentación	Acero corrugado fy= 4200kg/cm ²	160	kg
Muro de Isleta	Acero corrugado fy= 4200kg/cm ²	773	kg
Losa de Isleta	Acero corrugado fy= 4200kg/cm ²	137	kg
Relleno en isleta	Poliestireno expandido	233	kg

Maquinaria utilizada en la construcción del Peaje Punta Negra:

En la Tabla N°19 se puede observar el inventario de la maquinaria empleada para la construcción del Peaje Punta Negra. Esta maquinaria, al igual que la utilizada

en la construcción de la carpeta asfáltica, varía de acuerdo a cada una de las actividades realizadas en el período de desarrollo del proyecto. La maquinaria empleada en el peaje en comparación con la utilizada en la construcción de la carpeta asfáltica en la PS4 tiene un menor periodo de uso y menor cantidad de material colocado y removido, porque la construcción de la carpeta asfáltica requiere de un mayor maquinaria, tiempos, movimiento de material, variedad de escenarios, entre otros trabajos. Asimismo, las maquinarias empleadas para ambas construcciones son similares, pero no poseen el mismo rendimiento puesto que los trabajos que se realizaron en la construcción del peaje fueron distintos a los realizados en la carpeta asfáltica de la autopista.

Para el caso del peaje se usó información de rendimiento y tiempos de trabajo en base a los datos obtenidos en peajes similares, como el Peaje San Pedro y Peaje Espejo Chillón. Esto permitió tener una referencia para poder cuantificar el tiempo que labora cada una de las maquinarias.

La vida útil de la maquinaria utilizada en el Peaje Punta Negra fue igual a la que se asumió para la construcción de la carpeta asfáltica. A mayores, para el mixer de concreto, utilizado para el vaciado de concreto en el pavimento, se asumió una vida útil de 4 años equivalente a 8 000 horas de trabajo. La Tabla N°19 detalla la cantidad de kg de combustible usados en promedio para la construcción del peaje.

Tabla N°19: Inventario maquinaria construcción en el Peaje Punta Negra. Fuente: Adaptación personal.

Materiales/Combustibles	Cálculos	Cantidad	Unidad	Maquinaria
Diésel B5	$34 \cdot 2.66 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	304	kg	Rodillo compactador
Diésel B5	$52 \cdot 8 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	1400	kg	mixer de concreto
Diésel B5	$84.7 \cdot 2.5 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	712	kg	Retroexcavadora
Diésel B5	$339.04 \cdot 1.8 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	2053	kg	Mini cargador frontal
Diésel B5	$312 \cdot 8.79 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	9226	kg	Volquete
Diésel B5	$150 \cdot 3.3 \cdot \text{Galón} \cdot \text{densidad}$	1665	kg	Camión cisterna

Mantenimiento:

Mantenimiento PS4

En la Tabla N° 20 se puede observar la cantidad de materiales utilizados para realizar las labores de mantenimiento rutinario en un mes de trabajo convencional. El mantenimiento rutinario es el conjunto de actividades de evaluación y acción que se ejecutan frecuente y permanentemente en la autopista. Estas actividades se ejecutan con la finalidad de preservar todos los elementos viales con la mínima alteración y evitar una reducción de su vida útil. Para este inventario se tomaron en consideración

los materiales utilizados para realizar el mantenimiento en un mes referente al 2015. En este caso, se escogió el mes de agosto de 2015, dado que era el más completo y los datos de otros meses eran muy similares.

Este mantenimiento se basó en la reparación de baches en el asfalto, colocación de nueva pintura en la señalización horizontal en la autopista, reparación de imperfecciones en la vía, reemplazo de vigas de guardavías en caso hayan sido impactadas por vehículos, limpieza del pavimento, colocación de tachas retroreflectivas y captafaros que hayan completado su vida útil o bien hayan sido removidos por el pase de vehículos en la vía, reparación de estructuras de concreto, colocación de postes en los guardavías, entre otras actividades de menor importancia. El mantenimiento se cuantificó para los 12 meses del año. Los datos fueron proporcionados por la empresa concesionaria.

Tabla N°20: Inventario mantenimiento PS4. Fuente: Adaptación personal

Materiales/Combustibles	Cantidad	Unidad	Elemento
Concreto fácil	50.58	kg	Concreto fácil
Asfalto	5808	kg	Asfalto
Acero galvanizado	0.23	kg	Captafaros
Acero laminado	768	kg	Poste 1.20m
Acero laminado	600	kg	Poste Guardavía
Acero laminado	45	kg	Terminal tipo 1
Acero laminado	30	kg	Terminal tipo 2
Acero laminado	751.9	kg	Vida de Guardavía
Resina alcalina	16.2	kg	Pintura Óleo
Cemento Portland	127.5	kg	Cemento
Polivinilcloruro	3.92	kg	Cono de Señalización

Con respecto a la vida útil, dado que todos los materiales a colocar son temporales, se consideró la misma vida útil que la mencionada para los mismos materiales en el inventario de la construcción de la carpeta asfáltica de la PS4 y del Peaje Punta Negra.

Consumo eléctrico:

El consumo eléctrico en la PS4 solo se presenta en la zona aledaña al Peaje Punta Negra, en donde se han colocado una cierta cantidad de postes de alumbrado público. Asimismo, hay un consumo energético por parte del peaje y la iluminación propia de las casetas de cobro, entre otros componentes que consumen energía eléctrica. La información de este consumo fue brindada por la empresa concesionaria. Esta información se pudo obtener a partir de las facturas relacionadas al consumo eléctrico de la estación de cobro. La calidad de esta información es

notable, puesto que se pudo obtener de forma directa la cantidad de consumo eléctrico para algunos meses del año 2015 (Setiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre). Para poder complementar la cantidad de consumo eléctrico, se utilizó la información del año 2016 para los demás meses, asumiendo que el consumo eléctrico no varía de forma significativa entre un año y otro y ni entre meses. Finalmente, se puede observar el consumo eléctrico anual en la Tabla N°21.

Tabla N°21: Consumo eléctrico anual. Fuente: Adaptación personal.

Fecha	Consumo de energía (kWh/mes)
30/09/2015	2560
31/10/2015	2496
30/11/2015	2372
31/12/2015	2319
31/01/2016	2655
29/02/2016	2763
31/03/2016	2539
30/04/2016	2634
31/05/2016	2456
30/06/2016	2514
31/07/2016	2272
31/08/2016	2322

Flujo vehicular:

Para realizar el inventario del flujo vehicular en la PS4, se usó la información brindada por la empresa, obtenida a partir del uso de aforadores (medidores de cantidad de vehículos que transitan en la vía) que funcionan las 24 horas del día para poder realizar la cuantificación de los vehículos que transitan mensualmente. Esta información es de alta calidad dado que proporciona el dato real de la cantidad de vehículos dividiéndolos en tres bloques principales: vehículos de carga pesada, vehículos de transporte público y vehículos livianos. Los datos solo se pudieron obtener para 6 meses del 2015 (marzo-agosto), mientras que los otros 6 meses se modelaron a partir de aproximaciones para cada temporada del año. Estas aproximaciones fueron realizadas con la ayuda de especialistas en el rubro y usando un porcentaje de aproximación de acuerdo a cada etapa del año, ya que el flujo vehicular varía en base a un fuerte componente estacional, debido a que las personas tienden a viajar más a la zona sur de Lima en la época de verano y en épocas festivas como julio y diciembre. La Tabla N°22 presenta la cantidad de vehículos que transitan anualmente por la autopista PS4.

Tabla N°22: Inventario tráfico vehicular PS4. Fuente: Adaptación personal

Materiales/Combustibles	Cantidad	Unidad
Vehículo liviano	4826995	Vehículo
Vehículo de transporte publico	806259	Vehículo
Vehículo de carga pesada	544787	Vehículo

Por otro lado, puesto que la información brindada por la concesión no especifica los estándares de los vehículos que circulan por la vía, se tuvo que optar por asumir que los tres tipos de vehículos analizados poseen una tecnología vehicular EURO III. El estándar EURO se basa en el sistema europeo de control de emisiones para motores de vehículos nuevos, el cual incluye un conjunto de normas que buscan reducir la contaminación ambiental ocasionada por el parque automotor. Las emisiones que principalmente genera son: emisiones de PM, óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), hidrocarburos no quemados (HC) y de monóxido de carbono (CO) (EC, 2016).

En el Perú los vehículos de nueva adquisición hasta diciembre del 2015, tenían que cumplir con la directiva EURO III de emisiones. Por otro lado, ya se encuentran en el Perú vehículos que cumplen con la directiva EURO IV, pero este número es muy reducido, puesto que la importación de vehículos con esta tecnología es limitada y solo en ciertos departamentos del país (Lima, Arequipa, Cusco, Puno, Junín, Tacna, Moquegua y Madre de Dios) se puede obtener este tipo de combustible con bajo porcentaje de azufre (MINAM, 2016).

Finalmente, se eligió EURO III, porque los vehículos con esta normativa entraron al mercado en el 2007, al principio para vehículos de gasolina y luego se extendió a los vehículos diésel (MINAM, 2016), renovando el parque automotor progresivamente. Se espera que en pocos años la mayoría del parque automotriz esté regulado para esta normativa. Sin embargo, es importante precisar que el mercado automotor peruano cuenta con una flota de vehículos bastante antigua, por lo que es importante mencionar que mucho de estos vehículos tampoco cumplen con la directiva EURO III.

2.5 Evaluación de impactos ambientales

La tercera fase en un estudio de ACV es la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV). Su objetivo es evaluar la importancia del potencial de impactos ambientales utilizando los resultados del análisis del ICV. En el EICV se seleccionan un conjunto de variables medioambientales, denominadas categorías de impacto ambiental, las cuales se relacionan con los datos del inventario (ISO, 2006b). Estos

indicadores reflejan las emisiones agregadas o los recursos utilizados para cada categoría de impacto. La fase de evaluación de impacto ambiental incluye cuatro fases, de las cuales solo se desarrollaran las 2 primeras (ver Figura 11).

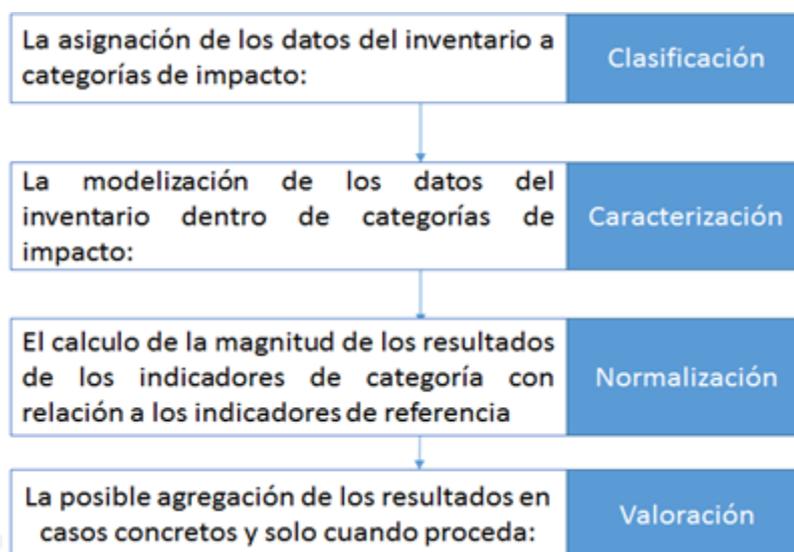


Figura 11: Fases de evaluación de impacto ambiental

Fuente: Adaptación personal

Los objetivos específicos de esta fase del ACV son los siguientes:

- Interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por todos los flujos de energía y materiales cuantificados en los distintos procesos del proyecto.
- Identificar las oportunidades de mejora del sistema analizado y ayudar en su jerarquización.
- Indicar las variables medioambientales, para que las otras técnicas puedan aportar datos medioambientales complementarios e información útil para los responsables de la toma de decisiones de la empresa.

Para comprender estos impactos de una forma más precisa y asequible se usó el software Simapro v8.2.0 Analyst. Este es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar el ACV mediante el uso de bases de datos de inventario generadas por el propio usuario o en base a fuentes bibliográficas como bases de datos, siendo utilizada en este caso la base de datos Ecoinvent® v.3.2. Esta se basa en actividades (procesos unitarios) para energía, transporte, materiales de producción, compuestos químicos, productos agrícolas, gestión de residuos entre otros (ECOINVENT, 2017).

El software sirve de unión entre los datos de ingreso (primarios y secundarios) con la metodología de análisis de impactos ambientales ReCiPe, la cual se basa en

transformar los datos del ICV en indicadores numéricos (ReCiPe, 2015). Esta evaluación permite dividir los resultados en distintas categorías como: asignar los datos del inventario en categorías de impacto que permitan establecer la condición en la que se encuentran los recursos del medio, para a partir de esta información poder tomar decisiones enfocadas en el desarrollo sostenible del proyecto (clasificación) y modelización en la categoría de impacto (caracterización).

Con respecto a la identificación de las categorías de impacto, estas fueron seleccionadas a partir de que cumplan con ciertas condiciones, para que su análisis y revisión en esta investigación sea correcto:

- **Integridad:** Las categorías identificadas deben cubrir todos los problemas ambientales relevantes.
- **Razones prácticas:** No hay que incluir demasiadas categorías, solo las necesarias de acorde a las características del proyecto.
- **Independencia:** Las categorías deben de ser independientes entre sí, para evitar doble conteo.
- **Posibilidad de integración en el EICV:** Existe una forma de conectar los resultados del inventario a las categorías de impacto, a través de una cuantificación numérica.
- **Métodos científicos:** Los métodos para la caracterización deben de ser científicamente aprobados.

La metodología ReCiPe incluye un total de 18 categorías de impacto, pero por las características del proyecto, el alcance y los objetivos de esta investigación, se optó por escoger 5 de estas y una categoría de impacto a partir de la metodología del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) 2013. Las seleccionadas fueron escogidas por las siguientes razones:

- **Calentamiento Global:** Se refiere al aumento gradual de las temperaturas de la atmósfera y océanos de la Tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Dicho incremento, provocado por los procesos de combustión con fines energéticos de carburantes fósiles y por la deforestación, además de su continuo aumento que se proyecta en gran medida para el futuro, es la preocupación actual de las principales potencias mundiales (EPA 2016). Dado que el Perú es firmante del Tratado de París tiene un compromiso de reducir las emisiones con respecto al sector transporte y energía. Esta categoría es la única que se computó a partir de una metodología distinta a la del ReCiPe puesto que la

metodología de este no se encuentra actualizada y, por otro lado, la metodología del IPCC 2013 presenta factores de caracterización actualizados (IPCC, 2013).

- **Material Particulado:** Su cómputo está justificado ya que al encontrarse la autopista en un terreno desértico urbanizado, la cantidad de material particulado es significativa por el propio terreno, así como la presencia de combustión de combustibles fósiles en el desarrollo de la construcción y mantenimiento de la vía. El material particulado es perjudicial para la salud ya que las partículas penetran en el aparato respiratorio, bloqueando los pulmones y evitando el paso del aire a través del organismo (EPA, 2016).
- **Formación de oxidantes fotoquímicos:** Estas sustancias son producidas por la quema de combustibles fósiles que generan contaminantes de aire formados por la reacción entre la luz solar y óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Afectan a la salud humana produciendo irritación en los ojos, problemas cardiológicos y respiratorios (EPA, 2016).
- **Categorías de recursos:** Esta meta-categoría se subdivide en tres categorías diferentes: agotamiento de combustibles fósiles, agotamiento de agua y agotamiento de metales. Se consideraron las categorías de agotamiento de combustibles fósiles y metales. Puesto que estas categorías en el ciclo de vida (en las fases de construcción, mantenimiento de la vía y uso) son importantes por todo lo que viene relacionado con la maquinaria, los vehículos que transitan por la autopista y la propia construcción del pavimento flexible y rígido.

El **agotamiento de combustibles fósiles**, se basa en la energía excedente para extraer una cierta cantidad de combustible fósil, como resultado de la menor calidad de los recursos, el alcance geográfico es dentro de los alrededores de la construcción de la autopista. La unidad de análisis es el kilogramo de petróleo equivalente.

El **agotamiento de minerales**, se basa en la energía excedente por kilogramo mineral, como resultado del descenso de las clases de minerales por el consumo durante el ciclo de vida del proyecto. La unidad de análisis es el kilogramo de hierro equivalente.

Estos agotamientos de los recursos son importantes, dado que este impacto será experimentado por las generaciones futuras, que tendrán que realizar mayores esfuerzos para extraer los recursos restantes.

- **Potencial de acidificación:** Durante la construcción, mantenimiento y uso de una carretera se generan una gran cantidad de gases acidificantes, justificando el uso de esta categoría de impacto. La acidificación es causada por la emisión de protones en los ecosistemas terrestres y acuáticos (estos últimos no considerados en esta investigación). En los sistemas terrestres los efectos se manifiestan como una disminución en el crecimiento del bosque y como consecuencia final su desaparición, dado que este es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles (EPA, 2016).

Por otro lado las categorías de impacto ambiental que no se consideraron para la elaboración de la investigación fueron las siguientes:

- **Potencial de agotamiento de la capa de ozono:** No se utilizó como categoría de impacto, ya que el Protocolo de Montreal ya cumplió sus principales objetivos en su mayoría y el agotamiento de la capa de ozono al día de hoy no es una preocupación que vaya en aumento, a comparación de como lo fue en los años 80 y 90.
- **El agotamiento del agua:** No se utilizó porque su consumo en obras de infraestructura vial no es relevante. Esta se basa en la cantidad de agua consumida durante el periodo del ciclo de vida (de la cuna a la tumba) del producto bajo estudio. La unidad de análisis es el metro cúbico (m³) de agua consumida.
- **Categorías de toxicidades:** No se computó ninguna de las categorías de impacto por toxicidad relacionadas con la toxicidad humana, aguas continentales, marina y terrestre, debido a que el modelado de los agentes tóxicos aún es incipiente y queda fuera del alcance de una tesis de pregrado.
- **Ocupación de suelo agrícola:** Esta categoría se descartó debido a que no es muy importante en esta investigación, dado que el recorrido de la autopista no se encuentra en una zona donde se compita con territorio agrícola.

- **Transformación del suelo natural:** No se incluyó dado que el valor ecosistémico del suelo es extremadamente bajo al ser una zona de características desérticas.
- **Ocupación del suelo urbano:** En el escenario a analizar no se presentan grandes concentraciones urbanas, por lo que no influye de forma trascendente en el ciclo de vida y por lo tanto su importancia decrece. Sin embargo, si es importante mencionar que en un futuro el crecimiento ordenado de la ciudad de Lima se proyecta hacia el sur de la ciudad, por lo que dicha categoría podría crecer en importancia.
- **Potencial de eutrofización:** Las categorías ligadas a la eutrofización se eliminaron del estudio dado que no es una prioridad en el enfoque de este estudio evaluar la calidad del agua.

Una vez realizada la clasificación, se procede a la caracterización de los datos. La caracterización se basa en que para cada método se describe y cuantifican las consecuencias ambientales para cada sustancia extraída y emitida, describiendo, que a su vez, el mecanismo ambiental de las sustancias emitidas. Finalmente, los resultados de los métodos de caracterización son los denominados factores de caracterización. Cabe mencionar que en el ACV se distinguen dos tipos de categorías diferentes en base a dónde se enfoca la cadena emisión-daño de cada categoría de impacto:

Método “Midpoint”: Identificado por trabajar con indicadores para la comparación de impactos ambientales a un nivel entre las emisiones de contaminantes y el daño final (European Commission – Joint Research Centre, 2011). El método *Midpoint* es más robusto y con menos incertidumbre a comparación de la metodología *Endpoint*, pero de más difícil entendimiento para los usuarios no familiarizados con el ACV, debido a que se enfoca en los efectos primarios, secundarios y terciarios producidos por las emisiones contaminantes a partir de términos de cuantificación química de la equivalencia de emisión para cada uno de los contaminantes.

Método “Endpoint”: Son métodos de caracterización, enfocados en trabajar con los indicadores para la comparación de impactos ambientales cerca del nivel de áreas de protección (European Commission – Joint Research Centre, 2011). Esencialmente, el *Endpoint* se caracteriza por ser información directa acerca de las

áreas afectadas por las emisiones (efectos o daños a la población y medio ambiente) que son los ecosistemas naturales, la salud humana, el agotamiento de recursos, entre otros, con el fin de identificar un tema ambiental preocupante (ISO 14044, 2006). A comparación del método *Midpoint*, el método *Endpoint* es más complejo y con mayor incertidumbre dado que se enfoca solamente en los daños generados por las emisiones, pero lo positivo es que es de mayor entendimiento para la población no ligada con el ACV porque utiliza terminología general. En la Figura 12 se puede apreciar la distribución de caracterización para cada metodología.

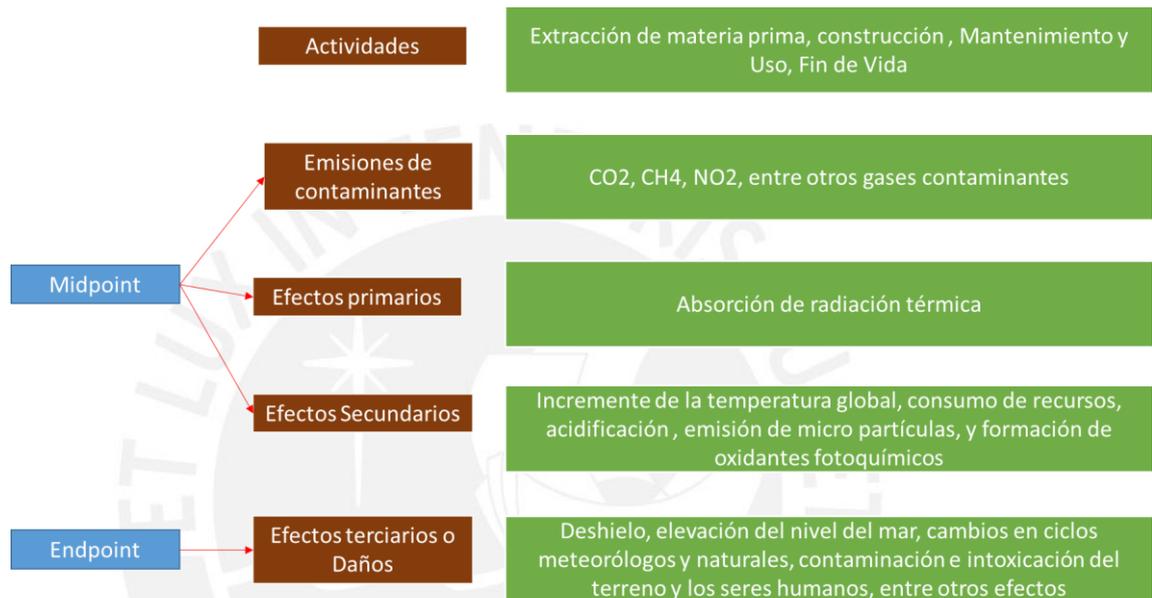


Figura 12: Caracterización por la metodología Midpoint y Endpoint

Fuente: Adaptación personal

En resumen, por un lado, los puntos de la metodología *Midpoint* se consideran puntos en la cadena de causa-efecto (mecanismo ambiental) de una categoría de impacto particular. Por otro lado, los *Endpoints*, son factores de caracterización que pueden ser calculados para reflejar la importancia relativa de una emisión o extracción en un ICV, por ejemplo, los potenciales de calentamiento global en términos de forzamiento radioactivo y diferencias de semivida atmosférica (Bare, 2000).

Para el desarrollo de esta investigación se tomó en consideración la metodología “Midpoint”, puesto que esta presenta los resultados en base a las emisiones producidas por las actividades ligadas a la PS4. La metodología “Endpoint” no se utilizó dado que, al enfocarse directamente en los efectos terciarios o daños producidos por las actividades del ciclo de vida de la autopista, hace que la

incertidumbre de los datos sea muy elevada y por lo tanto disminuiría la calidad de los resultados aportados por esta tesis.

2.6. Interpretación de resultados

Finalmente, la cuarta etapa del ACV se basa en la interpretación de los resultados obtenidos del tramo de la autopista a analizar, en concordancia con los objetivos y el alcance definidos al inicio de la investigación con el fin de poder llegar a conclusiones, limitaciones y recomendaciones para proyectos futuros (ISO, 2006b). Es importante comprobar la naturaleza y la calidad de los datos recogidos en consonancia con el objetivo definido. Los resultados de la fase de interpretación deben reflejar los resultados de los análisis de sensibilidad que fueron elaborados en el proyecto.

Una vez finalizado el ACV a partir de la ISO 14044 y a partir del análisis de los resultados, se propondrán alternativas y/o soluciones para ciertos procedimientos o materiales que podrían ser mejores para la construcción y para el desarrollo del proyecto. Además, se prevé poder utilizar la información obtenida para aplicarla a lo largo de toda la concesión y si es posible, en el futuro aplicarla en la construcción de nuevos proyectos de infraestructura a nivel nacional.

2.7 Análisis de sensibilidad

Para este estudio se realizó un análisis de sensibilidad, el cual se basó en evaluar la influencia de los resultados que se obtienen al cambiar datos importantes como cantidad de vida útil, tipo de pavimento, características de operación de mantenimiento, entre otras características importantes de la investigación (Goedkoop, 2008). El análisis de sensibilidad permite un mejor entendimiento de los resultados obtenidos en el escenario base de esta investigación. Asimismo, permite identificar cómo ciertas variaciones influenciarían en los resultados y en su posterior interpretación.

Los escenarios alternativos al escenario base (A1), incluidos en el análisis de sensibilidad fueron los siguientes:

- **A2:** Modificación del mercado automotriz peruano al último estándar Europeo (EURO V y EURO VI). Esta modificación se realizó, con el fin de comparar el impacto producido por el flujo vehicular asumido (EURO III), con respecto al estándar regulado europeo actual, donde se espera que los resultados sean positivos en la mitigación del impacto ambiental en relación al escenario base.

- **A3:** Modificación en la cantidad de vehículos livianos que transitan, incorporando el tránsito de vehículos eléctricos en un 10%. Esta modificación se desarrolló porque con el ingreso de los vehículos eléctricos el consumo de combustible diésel se reduce. Sin embargo, al comparar el impacto producido por los vehículos eléctricos con los vehículos livianos, los primeros producen una serie de impactos ambientales en su producción y operación, diferentes a los vehículos livianos diésel convencionales.
- **A4:** Modificación en el sL (cantidad de limo en la superficie) de una autopista modelada por el EPA estándar a una autopista industrial que contiene arena y grava. Esta modificación se efectuó para comparar la cantidad de emisiones de partículas al aire, producto del tráfico vehicular en una autopista que contiene mayor cantidad de arena y limos, a comparación del escenario base que fue modelado con una cantidad de limo en la superficie estándar.
- **A5:** Incremento del flujo vehicular a partir de las estimaciones generadas por la Municipalidad de Lima y la empresa concesionaria hasta el año 2020. Finalmente, esta última modificación se realizó con el fin de comparar el impacto del flujo vehicular en el escenario base (A1) con una estimación del flujo vehicular para los años del 2015-2020. Se espera un aumento en los impactos ambientales, producto del aumento de flujo vehicular propuesto por la empresa concesionaria en su estudio del tráfico a futuro.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

A partir del uso del programa Simapro v8.2 y de los métodos de análisis IPCC 2013 para el cómputo de potencial de calentamiento global y ReCiPe *Midpoint H* para las demás categorías de impacto a analizar, se procedió a la presentación de los resultados más importantes. En primer lugar, en la Tabla N°23 se indican las sustancias de referencia que se tomaron en cuenta para reportar el impacto ambiental en cada categoría de impacto. Dichas sustancias, que son las que fijan los propios métodos de análisis, están representadas en kg equivalentes.

Tabla N°23: Sustancias contaminantes para cada categoría de impacto. Fuente: Adaptación personal

Metodología	Categoría de Impacto	Unidad
ReCiPe	Acidificación terrestre	Kg SO ₂ eq
	Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg NMVOC
	Formación de micro partículas	Kg PM10 eq
	Depleción de metales	Kg Fe eq
	Agotamiento de los fósiles	Kg oil eq
IPCC 2013	Cambio climático	Kg CO ₂ eq

Construcción de la carpeta asfáltica de la PS4:

Los resultados que se presentan de la construcción de la carpeta asfáltica corresponden a la UF del proceso de producción, es decir, la cantidad de impacto ambiental asignado a la construcción de 1 km de la autopista PS4 en un año de operación. Por lo tanto, los resultados no son 1 km de carpeta asfáltica, sino la longitud equivalente (en torno a 950 m) para representar el kilómetro de autopista construido. Los resultados se presentan en la Tabla N°24, en donde se incluyen las categorías de impacto seleccionadas a partir de los métodos de análisis ReCiPe e IPCC 2013. En dicha tabla se puede apreciar que la maquinaria utilizada en la construcción del pavimento antiguo y el nuevo, la base granular y el pavimento nuevo (4 cm), son los elementos que mayor porcentaje de impacto producen en las 6 categorías de impacto analizadas en esta investigación. En el caso de la maquinaria, esta representa más del 30% y es la que genera mayor impacto en las categorías de acidificación terrestre (TA) y formación de oxidantes fotoquímicos (POF). Por otro lado, el pavimento nuevo representa un 33% y un 26%, respectivamente, en las categorías de Cambio Climático (CC) y agotamiento de combustibles fósiles (FD). Finalmente, la actividad que más impacto generó fue la base granular, la cual tuvo

un 25% o más de impacto en todas las categorías, siendo en la categoría de agotamiento de metales (MD) donde generó mayor impacto al emitir el 50% del total.

Tabla N°24: Resultados de impacto ambiental producidos por la etapa de construcción de la carpeta asfáltica de la PS4. Fuente: Adaptación personal

Categoría de impacto	Unidad	Total	Señalización horizontal	Tachas retroreflectivas	Pavimento nuevo	Guardavías vigas	Postes guardavías	Captafaros	Maquinaria asfalto	Base granular Autopista	Pavimento antiguo
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	191	2	0	51	12	6	0	60	47	12
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	178	2	0	42	7.5	4	0	67	46	10
Formación de micro partículas	kg PM10 eq	79	1	0	22.2	2.9	1.4	0	20	26	5
Agotamiento de metales	kg Fe eq	1336	25	0	326	0	0	0	231	676	78
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	10465	183	17	3524	698	343	1	2443	2410	846
Cambio climático	kg CO ₂ eq	31005	632	62	8297	2977	1465	5	7365	8211	1991

Construcción del Peaje Punta Negra:

Al igual que en la subsección anterior, la construcción del Peaje Punta Negra está referida a un año de operación teniendo en cuenta la vida útil correspondiente de cada una de las piezas que la conforman. En los resultados, se puede observar que el elemento que mayor porcentaje de impacto tiene es el sistema eléctrico para la mayoría de categorías de impacto, a excepción del CC. Así, el sistema eléctrico representa el 75% de las emisiones en TA, 42% en POF, 61% en formación de micro partículas (PMF), 69% en MD y 27% en FD. Por otro lado, en la categoría de CC el principal elemento causante de emisiones es el pavimento rígido con un 28% del porcentaje total. Dichos resultados se pueden observar en la Tabla N°25. Los resultados están referidos a la unidad funcional: 1 km de autopista en un año de operación.

Tabla N°25: Resultado impacto ambiental producido por la etapa de construcción del Peaje Punta Negra. Fuente: Adaptación personal

Categoría de impacto	Unidad	Total	Isletas	Marquesinas	Pavimento Rígido	Maquinaria en el peaje	Sistema eléctrico
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	7	0.4	0.4	0.5	0.5	5.3
Formación de oxidantes	kg NMVOC	3	0.4	0.4	0.5	0.5	1.3
Formación de micro partículas	kg PM10 eq	3	0.3	0.4	0.3	0.1	1.7
Agotamiento de metales	kg Fe eq	738	59	160	7	1.4	511
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	122	23	21	27	18.2	33
Cambio climático	kg CO ₂ eq	545	122	92	153	55	122

Impacto del tráfico vehicular en la PS4:

Para el tránsito vehicular en un periodo de tiempo de 1 año se muestran los resultados en la Tabla N° 26. El vehículo público es el elemento con mayor impacto ambiental, representando más del 50% del impacto en casi todas las categorías de impacto, a excepción de la categoría de MD. En esta última categoría, el elemento que mayor impacto genera es el vehículo liviano, con un 48% del agotamiento total de metales. Estos resultados se pueden apreciar en la Tabla N°26.

Tabla N° 26: Resultados de impacto ambiental producidos por el flujo vehicular en la PS4. Fuente: Adaptación personal.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Vehículo Liviano	Vehículo Público	Vehículo de Carga Pesada	Emisión de partículas por vehículos
Acidificación terrestre	t SO ₂ eq	1048	123	655	271	0
Formación de oxidantes fotoquímicos	t NMVOC	1594	134	1055	405	0
Formación de micro partículas	t PM10 eq	552	61	302	149	39
Agotamiento de metales	t Fe eq	8476	4066	2630	1780	0
Agotamiento de combustibles fósiles	t oil eq	65158	12549	34065	18544	0
Cambio climático	t CO ₂ eq	186209	37790	97118	51302	0

Mantenimiento

Para el mantenimiento realizado se obtuvieron una serie de resultados presentados en la Tabla N°27. La cuantificación de la etapa de mantenimiento se dividió entre los meses de mantenimiento de la concesión y el consumo eléctrico del Peaje Punta Negra. En los resultados se puede notar que el elemento que mayor porcentaje de impacto tiene es el mantenimiento realizado en el mes de agosto, con un 25% o más del total de emisiones, siendo la que mayor impacto genera en todas las categorías a excepción del FD y el CC. Con respecto al agotamiento de FD y CC, el elemento que genera mayor impacto es el consumo eléctrico del peaje, con un 27% y 30% respectivamente. Estos resultados se pueden contemplar en la Tabla N°27.

Tabla N°27: Resultados de impacto ambiental para 1 año de mantenimiento en la PS4. Fuente: Adaptación personal

Categoría de impacto	Unidad	Total	Consumo eléctrico Peaje Punta Negra	Mantenimiento mes de Julio	Mantenimiento mes de Agosto	Mantenimiento mes de Setiembre	Mantenimiento mes de Octubre	Mantenimiento mes de Noviembre	Mantenimiento mes de Diciembre
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	153	30.3	9.4	45.3	26.5	11.5	11.9	18.2
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	117	17.2	12.1	34.0	20.0	8.8	9.3	15.4
Formación de micro partículas	kg PM10 eq	71	14.0	4.9	19.9	11.8	5.2	5.5	9.5
Agotamiento de metales	kg Fe eq	2046	93.1	245.9	539.3	340.6	170.7	200.4	455.7
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	13467	3593.6	1136.5	3494.7	2048.5	896.1	920.2	1376.9
Cambio climático	kg SO ₂ eq	33839	9889.0	2652.7	8359.5	4834.3	2096.8	2184.8	3822.2

Resultados globales de la construcción y uso de la PS4 en el periodo de tiempo de 1 año:

A partir del ICV y de la evaluación ambiental, se obtuvieron los resultados para los subsistemas mostrados anteriormente en este capítulo. Al agregarlos se alcanzan los resultados generales del impacto producido por la PS4 desarrollada en esta investigación. Se puede apreciar en los resultados que el flujo vehicular representa más del 99% de las emisiones en todas las categorías de impacto investigadas. Con respecto a los otros elementos, estos unidos producen casi 1% del total de emisiones en todas las categorías, siendo el elemento que más emisiones emite la construcción de la carpeta asfáltica. Finalmente, se pueden observar los resultados en la Tabla N°28.

Tabla N°28: Resultados 1 km de carretera construido y operado en un año. Fuente: Adaptación personal

Categoría de impacto	Unidad	Total	Carpeta asfáltica	Peaje Punta Negra	Operación del peaje/autopista	Tráfico vehicular
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	46938	191	7.0	6.8	46733
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	71259	178	3.1	5.2	71072
Formación de micro partículas	kg PM10 eq	24694	79	2.7	3.2	24609
Agotamiento de metales	kg Fe eq	380072	1336	738	91	377907
Agotamiento de combustibles fósiles	t oil eq	2916	10	0.1	0.6	2905
Cambio climático	t CO ₂ eq	8335	31	0.5	1.5	8302

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de esta investigación demuestran que el impacto ambiental producido por esta infraestructura de gran envergadura es significativo. Por lo tanto, es importante que en próximas concesiones y construcciones se tenga en cuenta el impacto ambiental que este tipo de infraestructuras producen. Es así que a partir de estos resultados, se puedan realizar mejores y más renovadas metodologías tanto de diseño como de operación y construcción de las autopistas y carreteras.

4.1. Análisis del impacto ambiental de la PS4

Con respecto a los resultados obtenidos en el Capítulo 3 para el escenario base (A1), se dividieron los resultados para cada etapa del proyecto, analizándose en detalle las diferencias y las circunstancias que se dieron para que se presenten los resultados del impacto ambiental producido por la PS4 en general.

4.1.1 Análisis del impacto ambiental: Etapa de construcción

Respecto a la primera etapa de construcción, se puede observar en los resultados obtenidos para cada pavimento, rígido y flexible, que los elementos/materiales con un mayor impacto ambiental difieren. Esto se debe a que los procesos y materiales utilizados para cada tipo de pavimento son distintos. Por un lado, en la construcción de la carpeta asfáltica, la maquinaria utilizada representó más del 30% del impacto ambiental en las categorías de TA y POF debido al impacto producido por la fabricación de los vehículos y el consumo de combustible diésel. Asimismo, el pavimento asfáltico representó casi el 30% en CC y FD por la cantidad de mezcla asfáltica colocada durante los periodos de mantenimiento (cada 6 años), con un porcentaje de hidrocarburos significativo en su diseño de mezcla. Por otro lado, la base granular fue el elemento que más impacto causó en la construcción de la carpeta asfáltica y en el total de la etapa de construcción de la PS4, con un 25% o más en todas las categorías de impacto, a excepción de MD, en donde representó un porcentaje del 50%. Esta cantidad significativa de impacto es producto de que la base granular representó un volumen relevante de material utilizado en la construcción de la PS4.

Con respecto al Peaje Punta Negra, el elemento más significativo fue el sistema eléctrico, dado que representa el 40% del MD de toda la etapa de construcción de la PS4, producto de la fabricación y manufactura de las marquesinas y el cobre utilizado en el sistema eléctrico del peaje. Asimismo, se debe recalcar que el impacto producido por la construcción de la carpeta asfáltica es mucho mayor, 90% o más en casi todas las categorías a excepción de MD, que fue del 60%. Esto se

debe a que el tramo de la autopista es bastante mayor en longitud y por lo tanto, contó con un mayor movimiento de tierra y procesos constructivos. Sin embargo, se puede concluir que la construcción del Peaje Punta Negra implicó un impacto más intenso, dado que para su corta longitud involucró una carga ambiental significativa en el medio ambiente. Esta carga ambiental significativa se demuestra por ejemplo en la emisión de CO₂eq por metro lineal construido. El peaje produce 10.9 kg de CO₂eq, el cual es muy superior en comparación a la carpeta asfáltica que genera 1.40 kg. Por consiguiente, el impacto generado por el peaje es casi 10 veces mayor por metro lineal construido, resaltando así su impacto representativo.

Existen impactos ambientales vinculados al tráfico producido en los peajes convencionales. No obstante, estos no han sido modelados en esta investigación, ya que se encontraban fuera del alcance y además existía una carencia de datos de calidad. Estos impactos vinculados al tráfico en los peajes, hacen referencia a las emisiones producidas por el decrecimiento en el flujo de vehículos hasta que se realice el pago.

Como resultado de este decrecimiento en el flujo, aumentan las emisiones debido a demoras excesivas, colas y ciclos de cambio de velocidad (Coelho et al., 2005). A partir de lo encontrado en la literatura, se destaca que en ciertos países de Asia, Europa y Latinoamérica (Pickford et al., 2006; Saldaña Alegre et al., 2012; Xiao et al., 2008) ya se aplica en su totalidad el cobro electrónico de peajes (ETC por sus siglas en inglés). Este es parte de un sistema de transporte inteligente y es una tecnología que permite el pago electrónico de peajes a partir del uso de microondas, comunicación infra-roja y tecnología GPS. Esta tecnología sirve para eliminar la congestión vehicular producida en las estaciones de peaje (Chen et al., 2007).

Adicionalmente, con el uso de esta tecnología se reduce el impacto ambiental por dos motivos: el primero se basa en que al colocar un sistema ETC, ya no es necesaria la construcción de una infraestructura de peaje presencial, la cual produce un impacto significativo en la etapa de construcción y en segunda instancia, esta tecnología reduce la congestión producida en las estaciones de peaje, porque cuando se presenta un tráfico poco fluido, las emisiones de GEIs aumenta. Estas se producen en los peajes de cobro tradicionales, en donde los vehículos deben generar largas filas y tiempos de espera para poder transitar, reduciendo el flujo vehicular y por lo tanto, generando una mayor emisión a la atmósfera (EEA, 2014).

Finalmente, en el Perú ya se ha iniciado la introducción de esta nueva tecnología en vías principales como Vía de Evitamiento y la Panamericana Sur

(Salinas, 2013). No obstante, debido a la modalidad contractual en los proyectos de infraestructura pública (concesiones), es más complicado tener un sistema integrado de transporte eficiente ya que cada concesión tiene un sistema de recaudo de peaje distinto. Dicho de otro modo, es necesario tener más de una tarjeta electrónica para todas las concesiones de peaje existentes.

4.1.2 Análisis de impacto ambiental: Etapa de mantenimiento

El impacto ambiental asociado con el mantenimiento de la vía se dividió en el mantenimiento mensual aplicado en la concesión y el consumo eléctrico producido en el Peaje Punta Negra. Para las categorías de CC y FD, el factor más determinante fue el consumo eléctrico, producto de la cantidad de horas que se utiliza para la iluminación y operación del Peaje Punta Negra. Esto se debe a que la energía eléctrica en el Perú surge en base principalmente, de la explotación de combustibles fósiles para generar energía térmica y consecuentemente, la emisión de GEIs (Vázquez-Rowe et al., 2015). Por otra parte, para las demás categorías de impacto, el mantenimiento rutinario del mes de agosto fue el más influyente. Esto es producido porque en el año 2015 el mantenimiento rutinario incluyó: reparación de fallas en la superficie de la calzada, colocación de pintura, colocación de guardavías y captafaros, entre otros elementos.

Utilizando el mismo criterio que en la etapa de construcción, el impacto ambiental producido por el consumo eléctrico del peaje se podría disminuir a partir del uso de ETC, puesto que esta solución *free flow* (flujo libre), basada en pódicos y cobro electrónico, utiliza como única infraestructura pódicos con receptores-antena a lo largo de la traza de la autopista. Esta tecnología permite la individualización e identificación de cada vehículo, de modo que esta nueva solución disminuiría de forma significativa el consumo eléctrico y por lo tanto el impacto ambiental (Saldaña Alegre et al., 2012).

4.1.3 Análisis de impacto ambiental: Etapa de operación

Los impactos ambientales producidos por el flujo vehicular que transita por la autopista PS4 son de gran magnitud. Esto es debido a que el tránsito vehicular por esta vía es muy alto (ver Tabla N°21). Consecuentemente, al tener una gran cantidad de flujo vehicular, con un promedio de más de 16 000 vehículos por día, el impacto ambiental resultó ser elevado para cada una de las categorías de impacto analizadas.

Por un lado, se pudo observar que los tipos de vehículos que componen el flujo vehicular tuvieron distintos impactos para cada una de las categorías estudiadas. Para la mayoría de estas, el vehículo de transporte público fue el que

mayor impacto tuvo, seguido de los vehículos de carga ancha y, por último, los vehículos livianos. Este impacto significativo producido por los vehículos de transporte público se debe a que consumen más combustible que los vehículos livianos (siendo el tamaño del motor más grande) y porque transportan una elevada cantidad de toneladas por kilómetro (EEA, 2014), habiéndose considerado que circulaban a su capacidad máxima (50 personas).

Por otro lado, con respecto a su comparación con los de carga ancha, el vehículo de transporte público generó mayor impacto porque la cantidad de vehículos de este tipo en el año es superior a los de carga ancha, 13% y 8%, respectivamente. En efecto, el impacto producido por los vehículos de transporte público para las categorías de impacto convencionales es el siguiente: TA - 62 %, POF - 66%, FD - 52% y CC – 52%.

Sin embargo, para la categoría de impacto de MD, la operación de vehículos livianos fue superior, significando un 48% del agotamiento total de kg de Fe. Esto se debe a que el agotamiento de metales utilizado en los vehículos livianos es mayor, producto del alto flujo vehicular – 78% del total de vehículos que transitan por la vía. Finalmente, para la categoría de impacto PMF, se consideró de manera independiente la emisión de partículas producidas por el tránsito vehicular; la emisión de partículas por abrasión y fricción generada por el mismo. Los vehículos de transporte público fueron los de mayor impacto al generar un 54% del total de esta categoría de impacto.

4.1.4. Análisis de impacto ambiental: Sistema PS4

Finalmente, una vez que se ha discutido acerca del impacto producido en cada una de las etapas, se analiza el escenario base A1 en forma de un sistema completo. La principal etapa generadora de impacto ambiental es la etapa de uso y operación, debido al alto flujo vehicular que transita diariamente en la PS4. Al ser una autopista de 1^{era} categoría, su IMDA es muy alto, siendo un promedio mayor a 16 000 vehículos que transitan por la vía en un día, generando una gran cantidad de emisiones de GEIs (principalmente CO₂). Adicionalmente, el impacto se genera en la producción de los tres tipos de vehículos analizados y su consumo de combustible. Por ello, el flujo vehicular representa al menos el 99 % de los impactos en todas las categorías de impacto analizadas en esta investigación.

Sin embargo, es importante resaltar que la segunda etapa más influyente en todas las categorías de impacto es la etapa de construcción, específicamente la etapa de construcción de la carpeta asfáltica. Esto es producto de la longitud del

tramo, la gran cantidad de procesos constructivos y la cantidad de materiales utilizados. Por último, la etapa de mantenimiento es la que menos generación de impactos produce, debido a que los trabajos de rutina que se realizan en el transcurso del año para mantener la autopista con características óptimas para su uso, generan poco impacto y utilizan poco volumen de material contaminante a comparación de las demás categorías. Finalmente, se puede observar los resultados del escenario base A1 para todas las categorías de impacto en la Figura N°12 presentada más adelante.

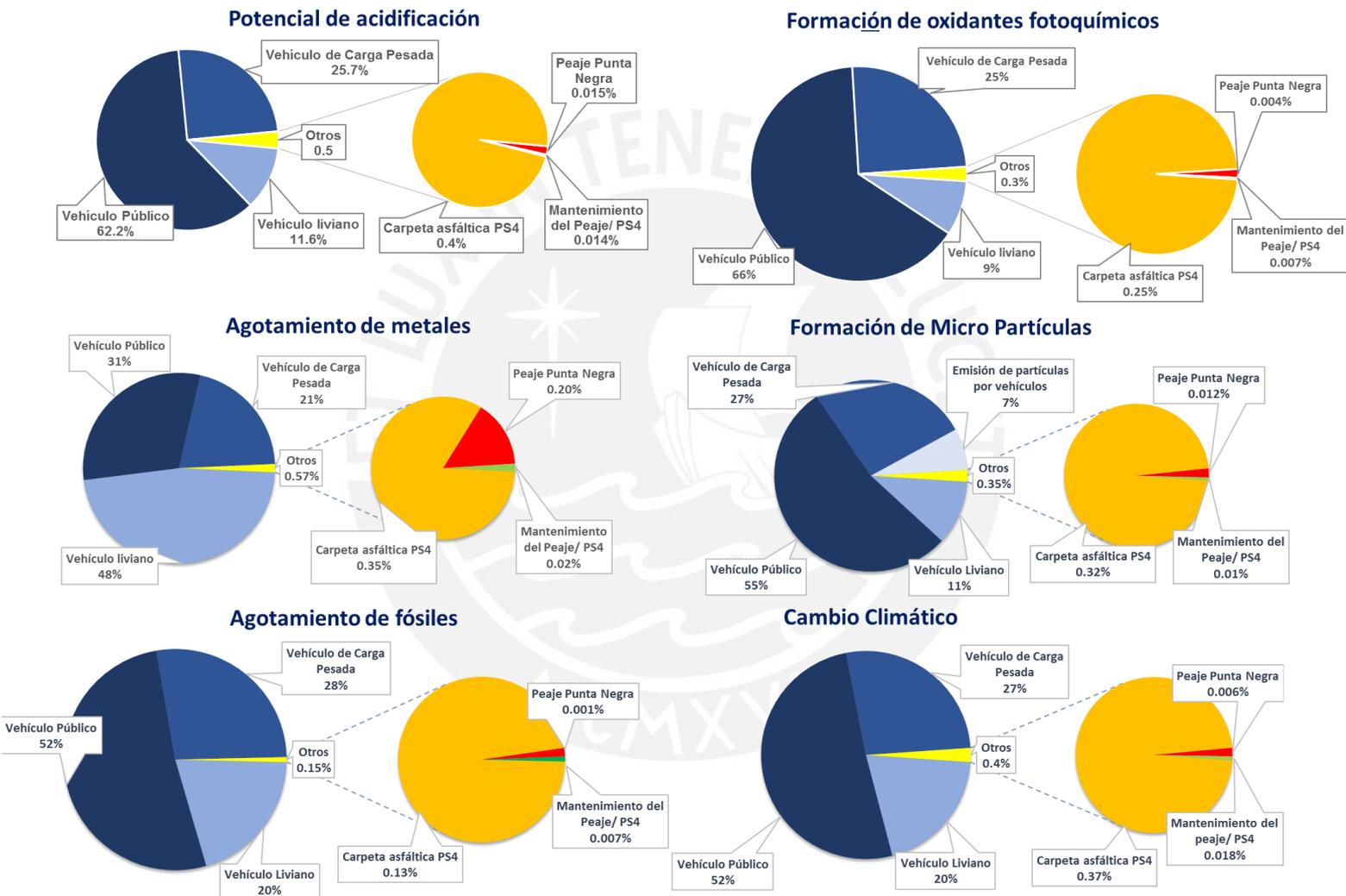


Figura 12: Resultados finales escenario base A1.

Fuente: Adaptación personal

Por otro lado, como se mencionó en la sección 2.7, para el desarrollo de esta investigación se ha optado por presentar un análisis de sensibilidad de los impactos de ciclo de vida para distintos escenarios, con características y circunstancias distintas al escenario base A1.

Con respecto al primer escenario alternativo A2 (implementación del último estándar Europeo en el mercado automotriz), se propuso comparar su impacto con el del flujo vehicular producido por A1. Este estándar propone el uso de la tecnología EURO V y EURO VI propuesta por la *European Commission* (EC), para vehículos livianos y pesados (carga ancha y transporte público), respectivamente (EC, 2016). Comparando ambos resultados, se obtiene que para las categorías de MD, FD y CC no hay una variación significativa (máximo 3%), mientras que por otro lado, hay una disminución considerable en las demás categorías de impacto en contraste con el escenario A1. Para el caso de la TA es 16%, POF 19% y para la PMF 14%; esta diferencia es producto de que los estándares EURO V y EURO VI implican un avance en la tecnología vehicular, incluyendo filtros y catalizadores más eficientes, para capturar y reducir las emisiones vehiculares (EC, 2016).

Para el escenario alternativo A3, se propuso modificar un 10% de vehículos livianos que circulan por la vía, por vehículos eléctricos convencionales. En la comparación obtenida, se puede observar que la variación en todas las categorías de impacto no es significativa, dado que presenta una diferencia en resultados de hasta 3.4% entre un escenario y el otro. Esta pequeña variación es producto del hecho que los vehículos livianos no son los que generan los impactos más importantes en el flujo vehicular, por lo que la modificación de un 10% no es significativa en los resultados finales. Se debe recalcar que no hay una relación proporcional en la reducción de emisiones de GEIs y el consumo de combustibles fósiles con respecto al uso de vehículos eléctricos. Esto ocurre debido a que el vehículo eléctrico en su uso no produce GEIs, pero en su etapa de fabricación y en la propia recarga de energía eléctrica, consume gran cantidad de energía térmica, puesto que el mix eléctrico nacional proviene de un 63% de energía térmica para el año 2015 (MINEM, 2016). Por lo tanto, se podría considerar que los vehículos eléctricos producen GEIs y consumo de combustibles fósiles debido al consumo eléctrico durante el periodo de fabricación y uso, variando en la cantidad de contaminación de acuerdo al mix eléctrico que posea cada país. Se debe recalcar que las emisiones producto de los vehículos eléctricos no ocurren a lo largo de la autopista, reduciendo el daño sobre las poblaciones aledañas (Hawkins et al., 2013).

Respecto al escenario alternativo A4, se presenta una modificación en la cantidad de limo en la superficie (sL) que se encuentra en la autopista, en donde se modificó la superficie de una autopista estándar clasificada por la EPA a una autopista con una superficie industrial con alto contenido de arena y grava. En los resultados obtenidos de esta comparación, se observa claramente que en la única

categoría en donde varía el impacto (de forma significativa) es en la categoría de PMF, a comparación de las demás categorías en donde no hubo variación alguna. Con respecto a la categoría de PMF, la diferencia es notoria, dado que el escenario A4 genera 76 veces más micropartículas comparado con el escenario A1. Esta gran diferencia es producto de la emisión de micropartículas a partir de la fórmula propuesta por la EPA (observar capítulo 2.4.1.) para re-suspensión de material particulado, el sL utilizado para una autopista estándar es de $sL = 0.03$ (EPA, 2002), mientras que para las autopistas industriales con alto contenido de arena y grava es de $sL = 70$ (EPA, 2002). Esta modificación significativa, junto con el alto flujo vehicular, es la razón por la que se produce esta alta diferencia. Esta variación significativa es a la vez, una evidencia de la necesidad de generar un modelo de carreteras en la costa peruana, para que así, al realizar el modelado de las emisiones generadas, se pueda llegar a resultados de mayor calidad y menor incertidumbre.

Finalmente, para el escenario A5 se propuso la modificación del flujo vehicular, a partir de las estimaciones generadas por la Municipalidad de Lima y la empresa concesionaria hasta el año 2020. Para esta modificación, se contó con la información dada por la empresa Rutas de Lima, acerca del aumento del flujo vehicular para los tres tipos de vehículos anualmente. Más adelante en el capítulo se puede observar en la Figura N°13 como el aumento del flujo vehicular va de la mano con el crecimiento de las emisiones en cada una de las categorías de impacto. Lo antes mencionado tiene sentido porque al aumentar el número de vehículos (para sus tres tipos), el número de emisiones aumenta de forma proporcional al aumento del tráfico vehicular. El periodo de tiempo analizado en el escenario A5, se prolonga desde el año 2016 al 2020 (5 años), a partir del año utilizado para el estudio del escenario A1 (2015). La variación entre el valor obtenido para el año 2015 y los años del A5 es notable, dado que la variación entre el año 2015 y el 2016 es de un promedio de 30% en todas las categorías; mientras que la diferencia entre el 2016-2020 varía anualmente como máximo en un 5%. Esto ocurre porque un valor estimado no es un valor neto real; por lo tanto, los resultados obtenidos en esta investigación tienen una mayor relevancia con respecto a los resultados obtenidos a partir de estas estimaciones.

Con respecto a la actualidad, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) el flujo vehicular a nivel nacional creció 4.1% entre abril del 2015 y el 2016, según el registro de las garitas de peaje en el país (INEI, 2016). Por lo tanto, se debe de tomar en consideración en estudios de construcción de autopistas y carreteras futuras, el creciente aumento en el flujo vehicular a nivel nacional.

Asimismo, el crecimiento del flujo vehicular va de la mano con el crecimiento del sector automotriz en donde se estima, según la Asociación Automotriz del Perú (AAP), que el dinamismo y el desarrollo de los sectores agroindustria y minería empujaría a un crecimiento del sector automotriz en un 10% para este año 2017 (AAP, 2017). Por lo tanto, se podría concluir que este aumento del flujo vehicular y del sector automotriz se presenta como un indicador de la actividad económica del país y reflejo de su crecimiento y desarrollo.

Este crecimiento del tráfico vehicular es un motivo por el cual varios países alrededor del mundo vienen desarrollando políticas de control y mitigación del impacto climático ocasionado por el tránsito vehicular. Un ejemplo es el caso de China, en donde desde la década de los años 90 se realizaron distintos esfuerzos por reducir el impacto de estas emisiones. Entre estas políticas están el control de nuevos vehículos, control de las emisiones de los vehículos en uso, control de la calidad de los combustibles, ensayos e investigaciones en diferentes alternativas de combustible, aprovechamiento del transporte público, entre otras políticas de mitigación para poder reducir las emisiones al aire (Wu et al., 2010). El Perú, como se mencionó en el capítulo 1.1.4., viene generando propuestas de mitigación para poder cumplir con el objetivo planteado para el 2030. Dentro de estas nuevas políticas se encuentran las relacionadas al sector transporte (Tabla N°29). Por lo tanto, se podría concluir que actualmente el Estado peruano está dispuesto a disminuir su cantidad de emisiones en el sector transporte, a partir de estas nuevas políticas que priorizan la reducción de las emisiones producidas directamente por el consumo de combustible fósil, la introducción de gasolinas eficientes, la modernización de los vehículos y la conversión a GNV en vehículos públicos y livianos (MINAM, 2016).

Tabla N°29: Opciones de mitigación consideradas en el sector transporte por la *Intended Nationally Determined Contributions* (iNDC). Fuente: Adaptación personal de la contribución Nacional del Perú – iNDC.

Opciones de mitigación consideradas			
Código	Sector	Nombre de iniciativa	Mitigación MtCO ₂ eq en 2030
T1	Transporte	Modernización de Vehículos de Transporte Público: Chatarreo (NAMA)	0.004
T2	Transporte	GNL en reemplazo de diésel para transporte pesado por carretera	0.555
T3	Transporte	GNV en Buses: conversión de motores y nuevas unidades	0.266
T4	Transporte	GNV en Vehículos: conversión de motores y nuevas unidades	0.269
T5	Transporte	Capacitación en Conducción Ecoeficiente	0.366
T6	Transporte	Introducción de Buses y Camiones Eficientes	0.542
T7	Transporte	Introducción de Vehículos Livianos Híbridos y Eléctricos	0.072
T8	Transporte	Introducción de Vehículos a Gasolina Eficientes	0.758
T9	Transporte	Sistema Integrado de Transporte (Líneas 2, 3 y 4 del Metro de Lima)	0.213

Finalmente, se puede observar en la Figuras N°13, 14 y 15 la comparación entre todos los escenarios propuestos, para las categorías de impacto evaluadas en esta investigación. Al igual que en los resultados calculados en el Capítulo 3, para la categoría de CC la metodología utilizada IPCC 2013 y para las otras 4 ReCiPe.

De acuerdo con lo observado en la Figura N°13, se concluye que el tráfico vehicular, además de ser la etapa que genera más impacto ambiental en todas las categorías de impacto evaluadas, es la etapa en donde cada uno de los subsistemas evaluados tienen una mayor modificación. En el caso del CC, se distingue que entre los escenarios A1, A2, A3 y A4 no hay una variación significativa con respecto a la emisión de GEIs, pero si es resaltante la variación de los primeros escenarios con los obtenidos en el escenario A5 (30% de variación promedio). Esto demuestra que el IMDA es el factor más significativo, dado que su aumento es proporcional al aumento de las emisiones de CO₂eq. Este patrón obtenido en la relación de los escenarios alternativos con el A1, es bastante similar en las categorías de impacto de FD o MD. Esto es producto de que efectivamente, el aumento de IMDA a través de los años, a la vez de aumentar la cantidad de emisiones de CO₂eq, genera mayor consumo de combustibles fósiles por el alto flujo vehicular y el aumento en el agotamiento de metales, por el alza en la producción de los tres tipos de vehículos analizados en esta tesis.

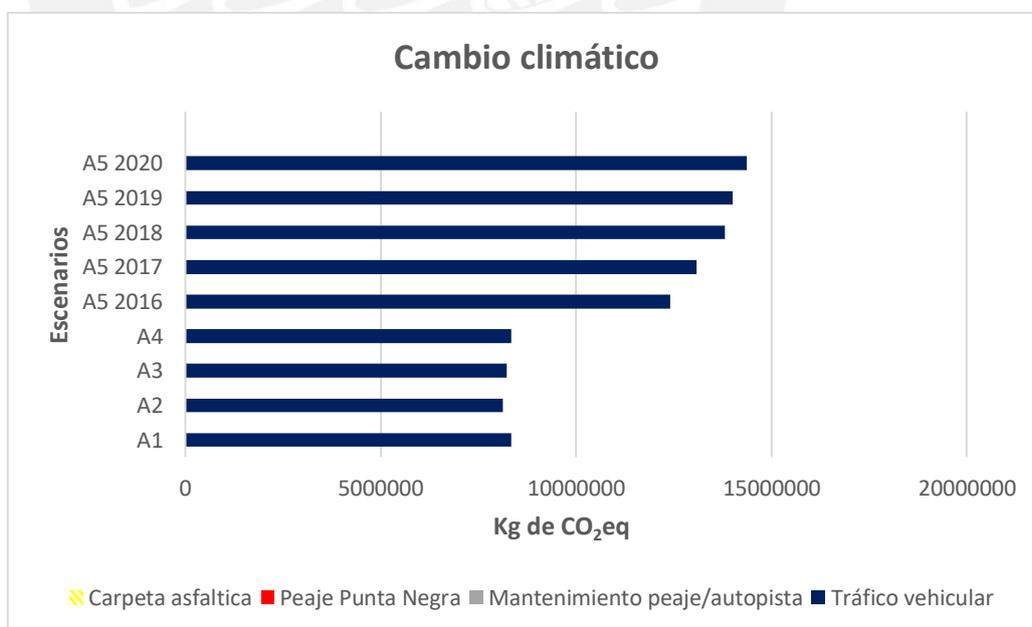


Figura N°13: Impacto ambiental en la categoría de CC para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año. Fuente: Adaptación personal.

Por otro lado, con respecto a la Figura N°14, se presenta la comparación entre todos los escenarios para la categoría de impacto de PMF. Estos resultados se presentan en una escala logarítmica para que se aprecien mejor las diferencias entre todos los escenarios. En la gráfica se puede distinguir claramente como casi todos los escenarios alternativos poseen una pequeña diferencia a comparación del escenario base, a excepción del escenario A4, que posee un mayor impacto. Como se mencionó anteriormente, esta diferencia evidente es generada por la modificación de la cantidad de limo en la superficie de la PS4, lo que nos ayuda a concluir que el aumento del material particulado es más sensible a las condiciones de la superficie de la autopista a comparación del aumento del flujo vehicular, el cual también aumenta pero en menor porcentaje en relación al escenario base.

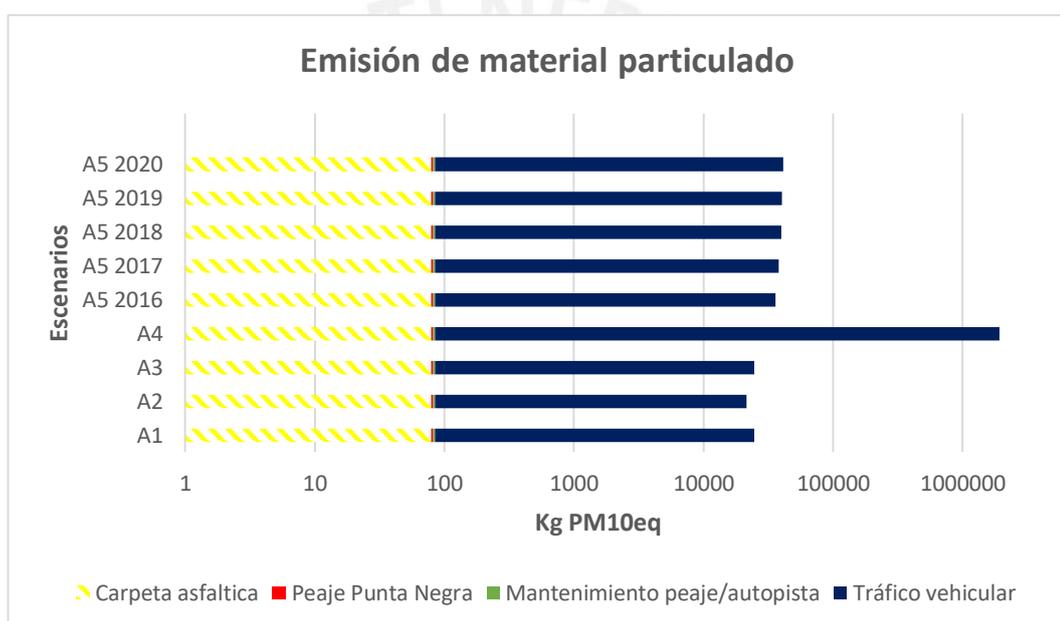


Figura N°14: Impacto ambiental en la categoría de PMF para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año. Fuente: Adaptación personal.

En la Figura N°15, se presenta la comparación entre todos los escenarios propuestos en relación al impacto generado en la categoría de TA. En la figura se puede observar, tal y como se había hipotetizado, que efectivamente a mayor IMDA la cantidad de kg de SO₂ es también mayor. Lo que destaca en esta figura es la reducción de las emisiones por parte del escenario A2 en comparación con los otros escenarios, probando que el uso de motores con el último estándar Europeo ayuda a reducir de manera considerable las emisiones. Asimismo, se puede observar que para los escenarios A3 y A4 se genera una emisión igual o menor a la generada por A1, comprobando que la alternativa de utilizar carros eléctricos o la variación en la

superficie del pavimento, no modifican de forma significativa la cantidad de acidificación terrestre producida durante el ciclo de vida de la PS4. Por último, este esquema obtenido es bastante similar al producido para la categoría de impacto de POF.

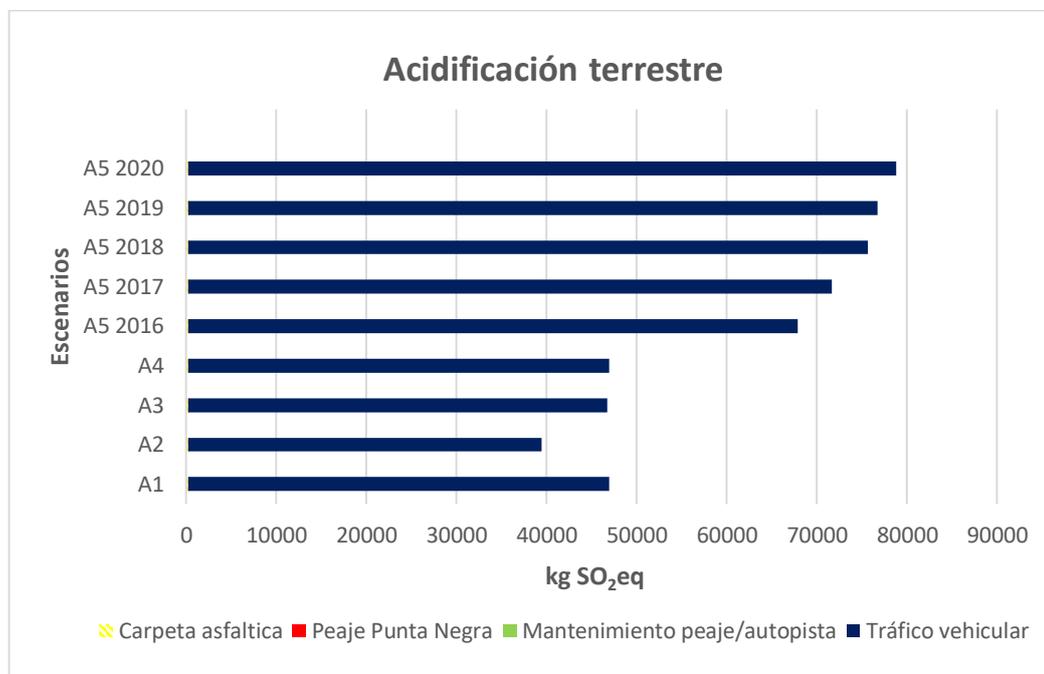


Figura N°15: Impacto ambiental en la categoría de TA para cada escenario, con una unidad funcional de 1 km de carretera construido en un año. Fuente: Adaptación personal

Una vez analizados los impactos generados para los escenarios alternativos propuestos en el análisis de sensibilidad, se procede a hacer una relación entre los resultados obtenidos en A1 con los obtenidos en distintas investigaciones encontradas en la literatura de características similares a la desarrollada en esta tesis.

Para esta parte final del capítulo se evaluaron cuatro estudios de ACV en carreteras y autopistas (Huang et al., 2009b; Milachowski et al., 2011; Mroueh et al., 2000; Stripple, 2001). Todos estos estudios de la literatura analizan pavimentos asfálticos al igual que la PS4, pero cada uno presenta ciertas características independientes como: condiciones ambientales, longitud del tramo, periodo de tiempo de vida, ubicación geográfica, flujo vehicular, entre otras características. Si bien todos los estudios son diferentes, los analizados presentan algunos patrones similares, dado que los cuatro se realizan en países europeos (en su mayoría en el norte del continente), donde generalmente se presentan condiciones climatológicas con presencia de heladas, a comparación de la autopista analizada que posee un

clima netamente desértico. Estos factores generan que la comparación de los resultados sea más complicada, puesto que presentan condiciones geográficas y climatológicas muy diferentes entre el escenario base y las observadas en la literatura.

Por otro lado, se presenta una dificultad añadida en el análisis de resultados por la diferencia en los enfoques realizados en cada investigación. Por ejemplo, se utiliza una unidad funcional distinta entre los escenarios analizados, no todos presentan el análisis de las mismas etapas del ciclo de vida y, por último, cada estudio plantea un enfoque y objetivos distintos por lo que los resultados son orientados a un análisis específico para cada investigación. Estas dificultades presentadas anteriormente impiden obtener resultados más precisos al realizar una comparación entre las cinco autopistas. Sin embargo, así se hayan presentado estas diferencias entre los estudios, igualmente se pudo realizar una comparación en cuanto a la cantidad de emisiones de GEIs que se emiten en cada una de las etapas del ciclo de vida analizadas. Por ello, se realizó la comparación únicamente en base a la categoría de impacto de CC, porque es la categoría de impacto más desarrollada en la mayoría de estudios de la literatura.

Para esta comparación, se eligieron modelados y estudios publicados en diferentes tiempos. Por un lado, en lo que respecta a los estudios más antiguos, uno es realizado en una carretera de asfalto en Suecia (Stripple, 2001) y el otro es el modelado de una carretera con pavimento asfáltico con una variación en las capas de sub-base y base, ubicado en Finlandia (Mroueh et al., 2000). Con respecto a los estudios más actualizados, el primero es un modelado de la reparación de un tramo de 2 km de una carretera de asfalto en el Reino Unido (Huang et al., 2009b), mientras que el otro es el estudio del impacto producido por la construcción, uso y mantenimiento de una autopista de asfalto de alto tránsito vehicular en Alemania (Milachowski et al., 2011). Esta variación en el periodo de tiempo de cada estudio nos permite observar que a medida que se avanza en el tiempo, se presentan ciertas variaciones como la mejora en la metodología implementada para el modelado de impactos y escenarios, los procesos constructivos, tecnologías, cuantificación en la emisión de impactos, entre otras características. Adicionalmente, se agregó el escenario A52020, a fin de poder comparar el impacto que se estima a futuro con los estudios analizados de la literatura y el escenario A1.

Finalmente, en la Tabla N°30 se pueden observar los seis estudios seleccionados y la cantidad de emisiones de CO₂eq que producen y su porcentaje de acuerdo al total de impacto producido por cada carretera o autopista. Para cada

carretera analizada se mantiene la tendencia que el flujo vehicular tenga un porcentaje mayor o igual al 95% del total de emisiones producidas para la unidad funcional. De esta forma, se demuestra que la mayoría de impacto se le atribuye a la etapa de tránsito vehicular y, por lo tanto, está relacionado al alto IMDA que circula por las carreteras con exceso de tránsito, resaltando la importancia que se le debe dar a la implementación de nuevas políticas de mitigación que disminuyan de forma directa la emisión para esta etapa.

Tabla N°30: Comparación de las emisiones de CO₂eq (t) por año de operación para 1 kilómetro de carretera entre la autopista PS4 y otras infraestructuras viales evaluadas en la literatura. Fuente: Adaptación personal

Emisiones de CO ₂ eq (t) por año de operación para 1 kilómetro de carretera			
Autor	Etapas	Emisiones de CO ₂ eq	Porcentaje del total
Stripple ¹	Construcción y mantenimiento	4.93E+01	10.40%
	Tráfico	4.23E+02	89.60%
Mroueh ²	Construcción y mantenimiento	5.62E+00	0.89%
	Tráfico	6.30E+02	99.11%
Milachowski ³	Construcción y mantenimiento	2.64E+03	1.13%
	Tráfico	2.31E+05	98.87%
Huang ⁴	Construcción y mantenimiento	2.48E+02	4.63%
	Tráfico	5.11E+03	95.37%
PS4 (Escenario A1)⁵	Construcción y mantenimiento	3.31E+01	0.40%
	Tráfico	8.30E+03	99.60%
PS4 (Escenario A52020)⁶	Construcción y mantenimiento	3.31E+01	0.23%
	Tráfico	1.44E+04	99.77%

¹ 13 m de ancho de vía, 5000 IMDA
² 17 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 7000 IMDA
³ 35m de ancho de vía, periodo de 30 años, 52 000 IMDA
⁴ 14m de vía, 50 años de periodo, 12 410 IMDA
⁵ 14m de vía, 50 años de periodo, 16 995 IMDA
⁶ 14m de vía, 50 años de periodo, 27 425 IMDA

Asimismo, se demuestra en el resultado del escenario A5, que a medida que aumente el número de vehículos, la emisión de CO₂ será mayor a comparación del escenario A1. Esto resalta la influencia del aumento anual del flujo vehicular con relación al impacto ambiental en la misma autopista. Finalmente, salta a la vista que

la autopista PS4 es la que mayor porcentaje de impacto genera en su etapa de tránsito a comparación de los estudios analizados de la bibliografía. Debido al aumento en el flujo vehicular que se genera anualmente, el Estado peruano está buscando soluciones alternativas para reducir el flujo vehicular. Entre las soluciones propuestas para aumentar la variación, oferta, transporte e inversión al sur del país, se han propuesto obras de infraestructura como: el tren de cercanías, que permitirá conectar velozmente la ruta Huacho – Lima – Ica (MTC, 2016); y la modernización del Terminal Portuario General San Martín de Pisco (MTC, 2016). Estos proyectos, además de la reciente apertura del Aeropuerto Internacional Capitán FAP Renán Elías Olivera, en Pisco (OSITRAN, 2016), reducirán la demanda de la autopista PS4 porque se presentan como medios alternativos de transporte en el sur del país, tanto de personas como de carga.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El proyecto desarrollado ayuda a tener un panorama más amplio de la realidad de la construcción de obras de infraestructura vial en el Perú y en el mundo. Esto evidencia que la introducción de la metodología de ACV en la etapa de diseño y planificación del proyecto aporta al mejoramiento y reducción de la cantidad de impacto generado por cada una de las fases del ciclo de vida de un proyecto o servicio, para cada una de las categorías de impacto.

Este análisis se efectuó debido al gran crecimiento del sector construcción en nuestro país y, a la vez, por la necesidad de investigar y conocer más acerca de la realidad sobre la relación que existe entre dicho sector y el medio ambiente afectado. Representando el sector de la construcción una parte muy importante de la actividad productiva del país, por su influencia en las comunidades, así como por los ingresos económicos y puestos de trabajo que genera. Sin embargo, su desarrollo debe estar enmarcado en el control del impacto que pueda generar a todo el ecosistema (comunidades, flora y fauna).

La investigación estimó los impactos ambientales generados durante todas las fases del ciclo de vida de un tramo de la autopista PS4 que comprende desde el kilómetro 35 hasta el kilómetro 58, aplicando la herramienta de ACV. La investigación propuso no solo brindar información acerca del impacto ambiental producido durante tres fases del ciclo de vida del lugar de estudio, sino también proponer nuevas tecnologías o métodos de mitigación ambiental para poder reducir el impacto que pueda ocasionar la construcción de futuras autopistas o carreteras a nivel nacional, mejorando tanto la calidad del producto como su relación con el medio ambiente.

Los resultados presentados en el Capítulo 3 y analizados en el Capítulo 4, demuestran que la etapa del ciclo de vida de la autopista que más influencia tiene sobre el medio ambiente es la etapa de uso (tráfico vehicular). De hecho, el mantenimiento y la construcción de la autopista estudiada tienen un bajo impacto ambiental en comparación al producido por el tráfico vehicular. Para las cinco categorías de impacto estudiadas en esta investigación, la etapa de tráfico vehicular representó al menos un 99% del impacto total generado en todo el ciclo de vida de la PS4. Este impacto producido durante el tránsito vehicular en el 2015 generó una huella de carbono igual a 186.9 kt CO₂eq por año, lo cual representa aproximadamente un 0.13% de las emisiones de GEIs emitidas en el 2014 a nivel nacional (MINAM, 2014). Este pequeño porcentaje representa un gran impacto ambiental, dado que implica una cantidad significativa de emisiones de carbono para

el uso de una sola obra de infraestructura a nivel nacional en un año. A pesar de que las etapas de construcción y mantenimiento no generan una cantidad de impacto ambiental significativa, para futuras construcciones de autopistas y carreteras en el Perú se podrían aplicar las metodologías analizadas en la literatura como la implementación del cobro de peaje electrónico, investigación e implementación de mejores diseños asfálticos, aplicación del reciclaje de asfalto y reutilización de materiales que reduzcan el impacto ambiental y mejoren las características del producto como la aplicación de neumáticos de caucho como aditivos.

Con respecto al análisis de los escenarios, se concluye que se presenta cierta variación en cada uno con respecto al escenario A1, hallándose la mayor disparidad en el escenario A4. Dicho escenario (A4) demuestra que al realizar un análisis de sensibilidad con respecto a la categoría de PMF, los modelos existentes no están ajustados a las realidades desérticas del Perú, por lo que a futuro se debería de mejorar el modelado de formación de partículas, para poder conseguir resultados más realistas con respecto a las condiciones climatológicas que se presentan en el Perú. En relación a los demás escenarios, se demuestra que al implementar el último estándar automotriz Europeo (EURO V y/o EURO VI) hay una influencia positiva en la emisión de partículas a la atmósfera, por lo tanto se debería evaluar la iniciativa de la implementación del nuevo EURO IV en Perú para mitigar el impacto ambiental. Para el caso del empleo de vehículos eléctricos, estos no demuestran una reducción significativa en los impactos ambientales. A pesar de que sí se ven reducidas las emisiones de GEIs y agotamiento de fósiles en la etapa de uso de dichos vehículos, estos producen un impacto considerable en la etapa de producción y manufactura. Sin embargo, sí sería una mejora en cuanto a la reducción de la contaminación del aire en las inmediaciones de la autopista, lo cual es importante puesto que se estima que la expansión de la población se dirige hacia el sur de Lima. Finalmente, para el último escenario, se evidencia que a medida que aumente el tráfico vehicular en la PS4, este será proporcional al crecimiento de las emisiones en todas las categorías de impacto, ya que con el aumento del flujo vehicular la etapa de uso se verá directamente afectada.

En esta investigación se analizaron cuatro casos de estudio de carreteras y autopistas encontradas en la literatura. Al compararlas, se observó que los resultados obtenidos se encontraron en rangos similares a los artículos observados en la literatura. Resalta de esta comparación que la PS4 fue la que mayor impacto generó en su etapa de uso, con un 99.6% del total de emisiones, a comparación de las otras. Esta problemática de congestión vehicular está siendo tratada por parte del Estado,

a partir de la evaluación de la implementación de soluciones como la construcción de infraestructura alternativa hacia el sur del país, con el fin de reducir el tráfico vehicular en la PS en ambos sentidos, aumentando la eficiencia de la autopista y mejorando la calidad de transporte y por lo tanto, la vida de las personas relacionadas directamente con esta vía de acceso a la capital.

Estas aseveraciones alcanzadas en el análisis y los resultados de esta tesis son de importancia, debido a que la PS es la principal vía de acceso del sur del país hacia la capital. En consecuencia, esto genera que la cantidad de vehículos sea elevada, tanto de salida como de ingreso. Este gran flujo vehicular es significativo para los tres tipos de vehículos que transitan por la vía, especialmente para los vehículos de carga ancha y de transporte público que transportan un importante número de pasajeros y carga, convirtiendo a este tramo de la PS, en una ruta crítica para el comercio hacia el exterior del país, dado que se debe de viajar por la PS para poder arribar al puerto internacional del Callao.

Se puede afirmar que el uso de nuevas prácticas o metodologías para contribuir a la mitigación del impacto ambiental deben de tomarse con una mayor consideración para el caso del sector construcción (específicamente en infraestructura), dado que hoy en día el calentamiento global es una realidad. El Perú en su compromiso de aportar a la mitigación del impacto ambiental, se ha comprometido en reducir sus emisiones y una de las herramientas para poder lograrlo es la implementación de la metodología del ACV en sus obras de construcción e infraestructura. Este es un reto para el sector construcción, puesto que se ha mantenido en su mayoría a partir de prácticas y métodos constructivos tradicionales, haciendo que la modificación y la implementación de nuevas tecnologías no se pueda realizar de forma sencilla o directa, por lo que debe hacerse de forma progresiva. Por este motivo, se debe de concientizar a las empresas, específicamente a las constructoras y a la población del país en general, que es imprescindible asociar el desarrollo del sector construcción y económico del país con la conservación y protección del medio ambiente. De hecho, el Perú, un país tan rico en biodiversidad y ecosistemas naturales, podría verse especialmente afectado por el cambio climático a comparación de otros países por la sensibilidad de sus ecosistemas.

Por último, es nuestro deber como profesionales, vernos involucrados y apoyar al desarrollo del país, sin dejar de lado la responsabilidad por cumplir con la sostenibilidad económica, social y ambiental con la que se deben relacionar los proyectos de infraestructura a gran escala.

REFERENCIAS:

Asociación Automotriz del Perú (AAP) (2016). Crecimiento del sector automotriz sería del 10% en el 2017. Disponible en: <http://elcomercio.pe/economia/peru/crecimiento-sector-automotriz-seria-10-2017-noticia-1953689> [Último acceso: 16 de Octubre de 2016].

Aranda, A., Martínez, A., Zabalza, I. (2006). *El análisis del ciclo de vida*. FC editorial. Madrid. ES.

Avadí, Á., Vázquez-Rowe, I., & Fréon, P. (2014). Eco-efficiency assessment of the Peruvian anchoveta steel and wooden fleets using the LCA+ DEA framework. *Journal of Cleaner Production*, 70, 118-131.

Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W., & De Haes, H. A. U. (2000). Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326.

Bennett, C. R., & Greenwood, I. D. (2001). Modelling road user and environmental effects in HDM-4. *World Road Association (PIARC), Paris/The World Bank, Washington, DC*.

Bermejo, J. (2016). ¿Por qué no se hacen más carreteras con más neumáticos reciclados? España. ABC Natural. Disponible en: http://www.abc.es/natural/desarrollorural/abci-no-hacen-mas-carreteras-neumaticos-reciclados-201603181059_noticia.html [Último acceso: 16 de Octubre de 2016].

Birgisdóttir, H., & Christensen, T. H. (2005). *Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration* (Doctoral dissertation, Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Environmental Science and Engineering Institut for Miljøteknologi).

Cámara de Comercio de Lima (2016). Minería, construcción y comercio liderarán PBI del 2016. Lima: El Comercio. Disponible en: <http://elcomercio.pe/economia/peru/ccl-mineria-construccion-y-comercio-lideraran-pbi-2016-noticia-1869626> [Último acceso: 16 de Octubre de 2016].

Carlson, A. (2011). Life cycle assessment of roads and pavements: Studies made in Europe.

Coelho, M., Farias, T., & Roupail, N. (2005). Measuring and modeling emission effects for toll facilities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1941), 136-144.

Chen, C. D., Fan, Y. W., & Farn, C. K. (2007). Predicting electronic toll collection service adoption: An integration of the technology acceptance model and the theory of planned behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5), 300-311.

Chiu, C. T., Hsu, T. H., & Yang, W. F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 545-556.

Cowherd, C., & Englehart, P. J. (1985). *Size-specific-particulate emission factors for industrial and rural roads: source category report. Final task report, June 1981-June 1985* (No. PB-86-122611/XAB). Midwest Research Inst., Kansas City, MO (USA).

Cruz, D. (2013). ¿Qué obras hacen falta para mejorar el acceso al puerto del Callao? Lima: El Comercio. Disponible en: <http://elcomercio.pe/economia/peru/que-obras-hacen-falta-modernizacion-puerto-callao-noticia-1653996> [Último acceso: 14 de Agosto de 2016].

De plásticos, A. D. L. P., & de polietileno, S. S. (2013). Estudio de Impacto Ambiental.

Ecoinvent (2016). Ecoinvent v3 database. Ecoinvent Centre. Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/> [Último acceso: 25 de Junio de 2016].

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2017). Aprueban Reglamento de protección Ambiental para el Sector Transportes. Disponible en: <http://busquedas.elperuano.com.pe/normaslegales/aprueban-reglamento-de-proteccion-ambiental-para-el-sector-t-decreto-supremo-n-004-2017-mtc-1487028-1/> [Último acceso: 22 de Enero de 2017].

EMEP-Corinair (2014). EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013 update Sept 2014.

Environmental Protection Agency (EPA) (1993). Emission Factor Documentation For AP-42, Sections 11.2.5 and 11.2.6 — Paved Roads, EPA Contract No. 68-D0-0123.

Environmental Protection Agency (EPA) (1995). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Carolina del Norte: Research Triangle park.

Environmental Protection Agency (EPA) (2010). MOVES2010 User Guide, United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. EPA420B-09-041

Environmental Protection Agency (EPA), (2002). MOBILE6 User Guide, United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. EPA420-R-02-02.

Environmental Protection Agency (EPA) (2014). Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014.

Environmental Protection Agency (EPA) (2016). Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. EPA. Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. [Último acceso: 25 de Noviembre de 2016].

Environmental Protection Agency (EPA) (2016). Términos Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos> [Último acceso: 25 de Noviembre de 2016].

European Commission, (2016). Transport Emissions, Air pollutants from road transport. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm> [Último acceso: 25 de Noviembre de 2016].

Gallardo, J. (2016). Gobierno prevé pavimentar 100% de vías nacionales recibidas en el 2011. Lima: Constructivo. Disponible en: <http://www.constructivo.com/cn/d/noticia.php?id=13008> [Último acceso: 12 de Mayo de 2016].

Garg, B. D., S. H. Cadle, P. A. Mulawa, P. J. Groblicki, C. Laroo, G. A. Parr. (2000). "Brake Wear Particulate Matter Emissions", Environmental Science and Technology, 34(21), 4463-4469

Goedkoop, M., De Schryver, A., Oele, M., Durksz, S., & de Roest, D. (2008). Introduction to LCA with Simapro v.7 *PRé Consultants, The Netherlands*.

Google maps (2016). Perú [mapa]. Disponible en: <https://www.google.com.pe/maps> [Último acceso: 12 de Mayo de 2016].

Gutiérrez, F. (2004). Capítulo 4, Diseño de pavimento

Harrison, R.M., A. M. Jones, J. Gietl, J. Yin, D. C. Green (2012). "Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic

Particles Derived from Atmospheric Measurements,"Environmental Science & Technology

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53-64.

Hellweg, S., & i Canals, L. M. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109-1113.

Hernández, S. (2008). *Impacto Ambiental y vida útil de los materiales más comunes en la industria de la construcción*.

Hilton, A. & Francy, N. (2010). *Diseño y conservación de pavimentos rígidos*. México.

Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009a). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283-296.

Huang, Y., Bird, R., & Bell, M. (2009b). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 197-204.

Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI (2016). Flujo vehicular a nivel nacional creció 4.1% en abril. Disponible en: <http://rpp.pe/economia/economia/inei-flujo-vehicular-a-nivel-nacional-crecio-41-en-abril-noticia-972698> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

ISO (2006a). ISO 14040. Environmental Management e Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organization for Standardization.

ISO (2006b). ISO 14044. Environmental Management e Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization.

IPCC (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change web site. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Joint Research Centre (2011). The European Commission's in-house science service. Disponible en: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc_ar_2011.pdf [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., & Gallice, G. (2016). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-16.

Lee, J., Edil, T., Tinjum, J., & Benson, C. (2010). Quantitative assessment of environmental and economic benefits of recycled materials in highway construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2158), 138-142.

Leiva, F. (2005). Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en Costa Rica), Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

Lewandowska, A. (2011). Environmental life cycle assessment as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS) part 1: Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment Int J Life Cycle Assess*, 178-186.

Linares, C., & Díaz, J. (2008). ¿Qué son las PM2.5, y cómo afectan a nuestra salud? *El Ecologista*, N°58. Disponible en: <http://www.ecologistasenaccion.org/article17842.html> [Último acceso: 14 de Agosto de 2016].

Lizcano, R., & Lizcano, F. A. A. R. (2003). *Diseño racional de pavimentos* (No. 625.8).

Londoño, C. (2012). Vida útil de estructuras en concreto: ¿De qué depende? Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/vida-util-de-estructuras-en-concreto-de-que-depende/> [Último acceso: 14 de Agosto de 2016].

Lopez, V. (2016). Reciclado de Pavimentos. Lima: Constructivo. Disponible en: <http://www.constructivo.com/cn/d/novedad.php?id=99> [Último acceso: 14 de Agosto de 2016].

Maître, O., Süßner, M., Zarak, C. (1998). "Evaluation of Tire Wear Performance", SAE Technical Paper 980256, doi: 10.4271/980256

Milachowski, C., Stengel, T., & Gehlen, C. (2011). Life cycle assessment for road construction and use. *European Concrete Paving Association, Brussels*.

Ministerio de Energía y Minas (MINEM) (2017). Generación de energía eléctrica año 2015. Disponible en:

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Capítulo%203%20Generacion%20electrica%202015%20FINAL.pdf> [Último acceso: 22 de Enero de 2017].

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2003). Reglamento Nacional de Vehículos. Decreto Supremo N° 058-2003-MTC. Disponible en: <https://www.mtc.gob.pe/transportes/terrestre/licencias/documentos/D.S.%20058-2003-MTC%20%20Reglamento%20Nacional%20de%20Veh%C3%ADculos.pdf> [Último acceso: 22 de Enero de 2017].

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2014). Manual de carreteras. Diseño Geométrico. Disponible en: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf [Último acceso: 22 de Enero de 2017].

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2015). Red Vial Nacional. Disponible en: http://www.mtc.gob.pe/logros_red_vial.html [Último acceso: 22 de Enero de 2017].

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) (2016). Declaran de interés nacional los trenes de cercanías Lima Norte y Centro. Lima: Diario Gestión. Disponible en: <http://gestion.pe/economia/asi-tren-cercanias-que-iniciara-gestion-ppk-2168168> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) (2016). Modernización de Puerto de Pisco iniciaría en octubre. Lima: Diario Gestión. Disponible en: <http://gestion.pe/economia/modernizacion-puerto-pisco-iniciaria-octubre-2165521> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). 380 mil toneladas de CO₂ son emitidas diariamente en el Perú. Lima: La Republica. Disponible en: <http://larepublica.pe/25-11-2014/380-mil-toneladas-de-co2-son-emitidas-diariamente-en-el-peru> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015). Contribución prevista y determinada a nivel nacional (INDC) de la República del Perú. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/09/ESPA%C3%91OL.pdf>. [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015). Construyendo Participativamente la contribución nacional: Propuesta del Perú (iNDC) para consulta pública. Disponible

en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/06/contribucion-iNDC21.pdf>
[Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2016). Preguntas y Respuestas para entender el caso del Euro IV, Julio 2016. Disponible en: http://infoaire.minam.gob.pe/INFOAIRE/archivos/zonaeducativa/publicacion/preguntas_respuestas_Euro_IV.pdf [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M., Ruotoistenmäki, A. (2000). Life Cycle Assessment of Road Construction. Finnish National Road Administration. Finnra Reports 17/2000.

Noshadravan, A., Wildnauer, M., Gregory, J., & Kirchain, R. (2013). Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 131-138.

Ortega, A. (2015). Trabajo 7 - Pavimentos Flexibles, 1-9. Disponible en: <http://documentslide.com/documents/trabajo-7-pavimentos-flexibles.html> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público (OSITRAN) (2016). Inauguración de las instalaciones del nuevo Aeropuerto Internacional de Pisco. Lima: El comercio: Disponible en: <http://elcomercio.pe/economia/peru/lo-que-debes-saber-sobre-aeropuerto-internacional-pisco-noticia-1890755> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Pachón, Á., & Ramírez, M. T. (2006). La infraestructura de transporte en Colombia durante el siglo XX. Fondo de Cultura Económica.

Park, K., Hwang, Y., Seo, S., Seo, H. (2003) Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *J. Constr. Eng. Manag.* 129(1), 25-31.

Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable energy*, 31(1), 55-71.

Pérez, G. J. (2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia (No. 012679). BANCO DE LA REPÚBLICA-ECONOMÍA REGIONAL.

Pickford, A. T., & Blythe, P. T. (2006). *Road user charging and electronic toll collection*. London: Artech House.

Plevin, R. J., Delucchi, M. A., & Creutzig, F. (2014). Using attributional life cycle assessment to estimate climate-change mitigation benefits misleads policy makers. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 73-83.

PRé-Consultants, S. (2014). Life Cycle Assessment Software (version 8.0.5.) [Software]. The Netherlands.

Prodac, Soluciones Viales (2016). Catalogo de Guardavías. Disponible en: <http://prodac.bekaert.com/es-mx/infraestructura/soluciones-viales/seguridad-vial/guardavias> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Rattia, Jorge (2014). Definición y Características de Los Pavimentos Flexibles. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/233881453/Definicion-y-Caracteristicas-de-Los-Pavimentos-Flexibles> [Último acceso: 14 de Octubre de 2016].

Quispe, I., Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Arena, A.P., Suppen, N. (2016) Preface: Life Cycle Assessment: A tool for innovation in Latin America. *Int. J. Life Cycle Assess.*

ReCiPe. (2015). ReCiPe Web Site. Disponible en: <http://www.lcia-recipe.net/project-definition> [Último acceso: 10 de Setiembre de 2016].

Rutas de Lima S.A.C. (2012) Contrato de concesión del proyecto "Vías nuevas de Lima". Disponible en: http://rutasdelima.pe/pdf/contrato_concesion.pdf [Último acceso: 10 de Setiembre de 2016].

Salinas, E. (2013). Antes de Julio funcionarán peajes electrónicos en el Sur. Lima: La Republica. Disponible en: <http://larepublica.pe/21-12-2013/antes-de-julio-funcionaran-peajes-electronicos-en-el-sur> [Último acceso: 10 de Setiembre de 2016].

Saldaña Alegre, P., & Vassallo Magro, J. M. (2012). Implantación de nuevos sistemas electrónicos de cobro de peaje en España. *Revista de Obras Públicas*, 159(3528), 7-22.

Sánchez, L., & Hacking, T. (2012). An approach to linking environmental impact assessment and environmental management systems. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 25-38.

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9), 801-809.

SEBASl (2016). Captafaros y ojo de gato. Disponible en: <http://sebasl.com/productos/balizamientos/captafaros-ojos-de-gato/> [Último acceso: 10 de Setiembre de 2016].

Signo Vial (2016). Tachas Reflectivas, adherencia y reflectividad. Disponible en: signovial.pe/blog/tachas-Reflectivas-adherencia/ [Último acceso: 10 de Setiembre de 2016].

Sotil, A. (2014). Pavimentos, Parte 1 – Introducción a la Ingeniería de Pavimentos. Disponible en: <http://es.slideshare.net/kevinromerolatorre/tipos-de-pavimentos> [Último acceso: 08 de Julio de 2016].

Stripple, H. (Marzo). Life Cycle Assessment of Road. IVL Swedish Environmental Research Institute, 1, 1-90.

Tukker, A. (2000). Philosophy of science, policy sciences and the basis of decision support with LCA Based on the toxicity controversy in Sweden and the Netherlands. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3), 177-186.

Vázquez-Rowe, I., Reyna, J. L., García-Torres, S., & Kahhat, R. (2015). Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? *Applied Energy*, 159, 108-116.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Quispe, I., & Bentín, M. (2016). Environmental profile of green asparagus production in a hyper-arid zone in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2505-2517.

Vázquez-Rowe, I., Cáceres, A. L., Torres-García, J. R., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4369-4383.

Xiao, Z. H., Guan, Z. Q., & Zheng, Z. H. (2008). The research and development of the highway's electronic toll collection system. In *Knowledge Discovery and Data Mining, 2008. WKDD 2008. First International Workshop on* (pp. 359-362). IEEE.

Ysla, Z. (2015, Julio) Ecoinvent planea desarrollar bases de productos y servicios. Disponible en: https://www.ecoinvent.org/files/20150716_elcomercio_2015-07-16_desarrollo_ecoinvent.pdf [Último acceso: 08 de Julio de 2016].

Wu, Y., Wang, R., Zhou, Y., Lin, B., Fu, L., He, K., & Hao, J. (2010). On-road vehicle emission control in Beijing: past, present, and future.

Zhang, H., Lepech, M. D., Keoleian, G. A., Qian, S., & Li, V. C. (2009). Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, 16(4), 299-309.

