

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN TRAMO DE LA CARRETERA TACNA -
COLLPA EN LA REGIÓN DE TACNA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Alvaro Alejandro Elorrieta Mendoza

ASESOR:

Ian Vázquez Rowe, PhD

Lima, Enero, 2023

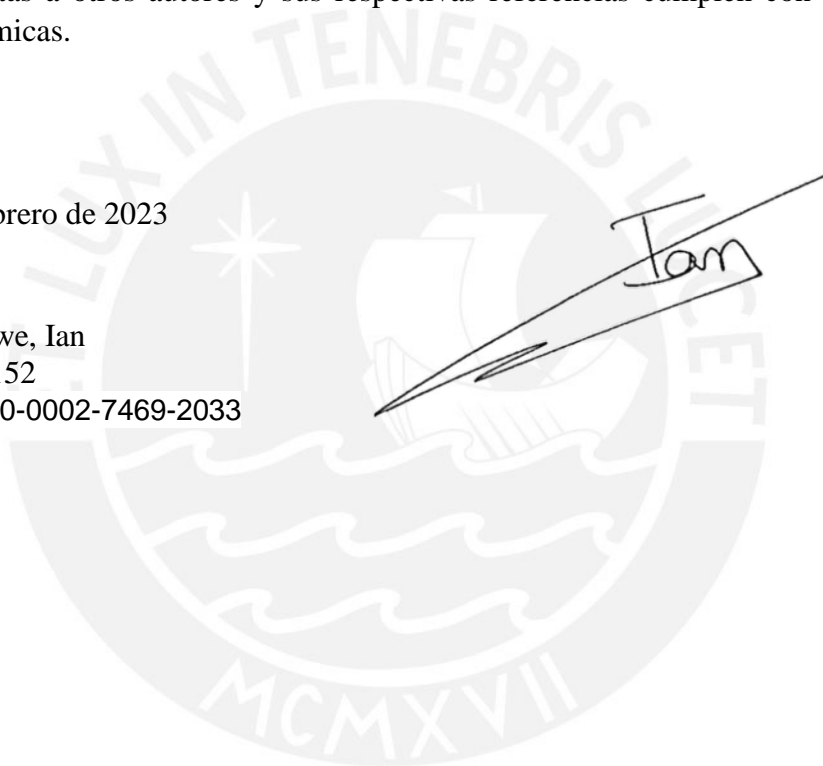
Informe de Similitud

Yo, Ian Vázquez Rowe, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado Análisis de ciclo de vida de un tramo de la carretera Tacna-Collpa en la región de Tacna del autor Álvaro Alejandro Elorrieta Mendoza dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 28/01/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 3 de febrero de 2023

Vázquez Rowe, Ian
CE: 001084152
ORCID: 0000-0002-7469-2033



RESUMEN

Las carreteras son infraestructuras esenciales para el desarrollo económico y social de cualquier país. No obstante, también son responsables de una considerable cantidad de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debido al uso intensivo de materiales y maquinaria que conlleva su construcción y mantenimiento, incluyendo su posterior operación por vehículos terrestres. Por ello, resulta indispensable que se haga una evaluación de impacto ambiental (EIA) apropiada que permita estimar los impactos ambientales de los proyectos viales en Perú. Aunque ya existe una normativa vigente en Perú que los obliga a tener una EIA para su ejecución, la mayoría de estas se limita a dar información cualitativa sin que se ajuste a la realidad de cada proyecto vial por falta de información y financiamiento apropiado.

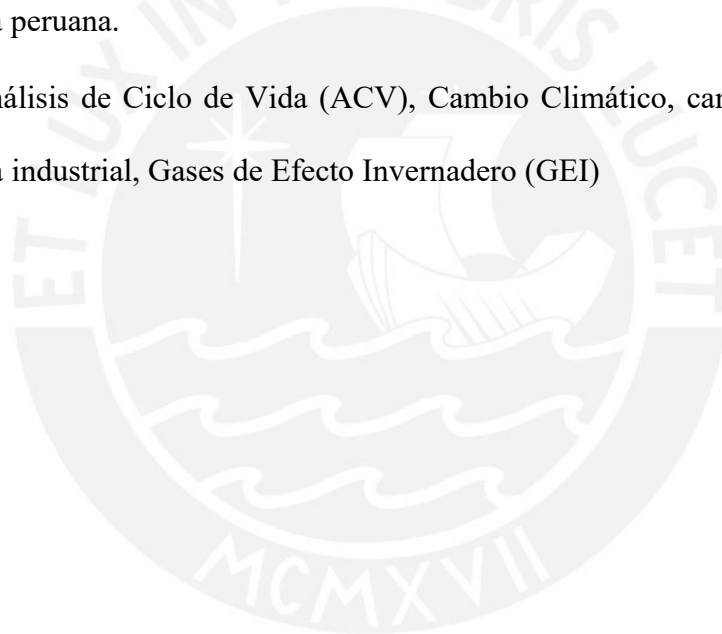
En ese sentido, se utilizó la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para complementar y nutrir la EIA del primer tramo de la carretera Tacna-Collpa de 52 km de extensión en la región sureña de Tacna al determinar los impactos ambientales detalladamente. Utilizando los lineamientos estipulados en la normativa ISO 14040 y 14044; se evaluó las fases de construcción, uso y mantenimiento mediante la unidad funcional de 1 km de carretera en un año de operación. Las fuentes de datos primaria fueron el expediente técnico del proyecto, el estudio de tráfico de la zona y el reporte de mantenimiento para el año 2022; las cuales fueron complementadas con la base de datosecoinvent v3 y reportes públicos del Estado peruano y del Gobierno regional de Tacna. Asimismo, la emisión de material particulado fue modelado de forma independiente. Mediante la metodología ReCiPe 2016 e IPCC 2013, se establecieron siete categorías de impacto como cambio climático, transformación de uso de suelo, formación de partículas, entre otros.

Este estudio de ACV permite comprender de una manera más amplia los impactos ambientales de una carretera en la sierra de Perú y sus resultados arrojan que la mayoría de estos en distintas categorías se acoplan en la etapa de uso. Por ejemplo, en la categoría de cambio climático, 85 ton CO₂eq corresponden directamente al uso propio de la carretera mientras que 68 ton CO₂eq fueron generadas por su construcción para un año de operación. La principal razón de estos valores fue por la presencia en su mayoría de vehículos livianos y buses según el estudio de tráfico del proyecto y por ser la principal vía de conexión entre los países de Perú y Bolivia. Por otro lado, el mantenimiento no llegó a tener un valor considerable en todas las categorías analizadas. Asimismo, mediante un análisis de sensibilidad se compararon escenarios alternativos para determinar la

influencia en comparativa al escenario base entre los que se incluyó el uso de vehículos eléctricos. En este análisis se concluyó que el uso de vehículos eléctricos o con normativa Euro VI ayudan a disminuir los impactos ambientales en todas las categorías de impacto. Del mismo modo, la falta de mantenimiento hace que aumente las emisiones de material particulado en la fase de uso hasta cinco veces su valor original.

Finalmente, se realizaron recomendaciones de prácticas sostenibles en base a las principales fuentes de contaminación ambiental halladas en la investigación como el uso de biodiesel B20 en la maquinaria de construcción o la inclusión de materiales reciclados en la colocación del pavimento. Estas recomendaciones pueden aplicarlas empresas constructoras y el gobierno peruano mediante lineamientos y directivas para la ejecución de futuros proyectos viales en regiones de la sierra peruana.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Cambio Climático, carreteras, construcción sostenible, Ecología industrial, Gases de Efecto Invernadero (GEI)



ABSTRACT

Roads are essential infrastructures for the economic and social development of any country. However, they are also responsible for a considerable amount of Greenhouse Gas (GHG) emissions due to the intensive use of materials and machinery that entails its construction and maintenance, including their subsequent operation by land vehicles. Therefore, it is essential that an appropriate environmental impact assessment (EIA) be carried out to estimate the environmental impacts of road projects in Peru. Although there is already a current regulation in Peru that obliges them to have an EIA for its enforcement, most of these are limited to providing qualitative information without adjusting to the reality of each road project due to lack of information and appropriate financing.

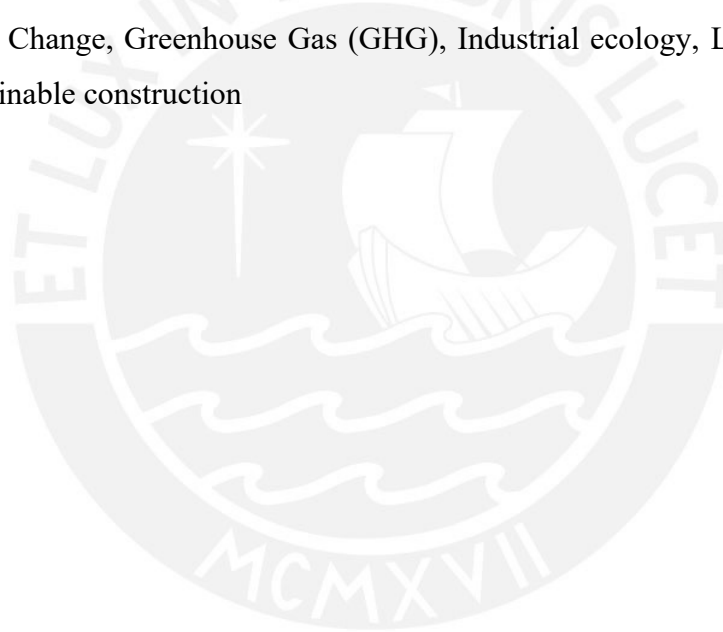
Thus, the Life Cycle Assessment (LCA) tool was used to complement and nourish the EIA of the first section of the 52 km stretch Tacna-Collpa road in the southern region of Tacna by determining the environmental impacts in detail. Using the guidelines stipulated in the ISO 14040 and 14044 standards; construction, use and maintenance phases were evaluated through the functional unit of 1 km of highway in one year of operation. Primary data sources were the technical file of the project, the traffic study of the area and the maintenance report for the year 2022; which were complemented with the ecoinvent v3 database and public reports from the Peruvian state and the regional government of Tacna. Likewise, the emission of particulate matter was modeled independently. Through the ReCiPe 2016 and IPCC 2013 methodology, seven impact categories were established such as climate change, land use transformation, particle formation, among others.

This LCA study allows a broader understanding of the environmental impacts of a road in the highlands of Peru and its results show that most of these in different categories are coupled in the use stage. For example, in climate change category, 85 tons of CO₂ eq correspond directly to the road's own use, while 68 tons of CO₂ eq were generated by its construction for one year of operation. The main reason for these values was due to the presence of mostly light vehicles and buses according to the project's traffic study and because it is the main connection route between the countries of Peru and Bolivia. On the other hand, maintenance did not have a considerable value in all the categories analyzed. Likewise, through a sensitivity analysis, alternative scenarios were compared to determine the influence in comparison to the base scenario, among which the

use of electric vehicles was included. In this analysis, it was concluded that the use of electric vehicles or vehicles with Euro VI regulations help reduce environmental impacts in all impact categories. Similarly, the lack of maintenance causes particulate matter emissions in the use phase to increase up to five times their original value.

Finally, recommendations for sustainable practices were made based on the main sources of environmental contamination found in the investigation, such as the use of B20 biodiesel in construction machinery or the inclusion of recycled materials in the laying of the pavement. These recommendations can be applied by construction companies and the Peruvian government through guidelines and directives for the execution of future road projects in regions of the Peruvian highlands.

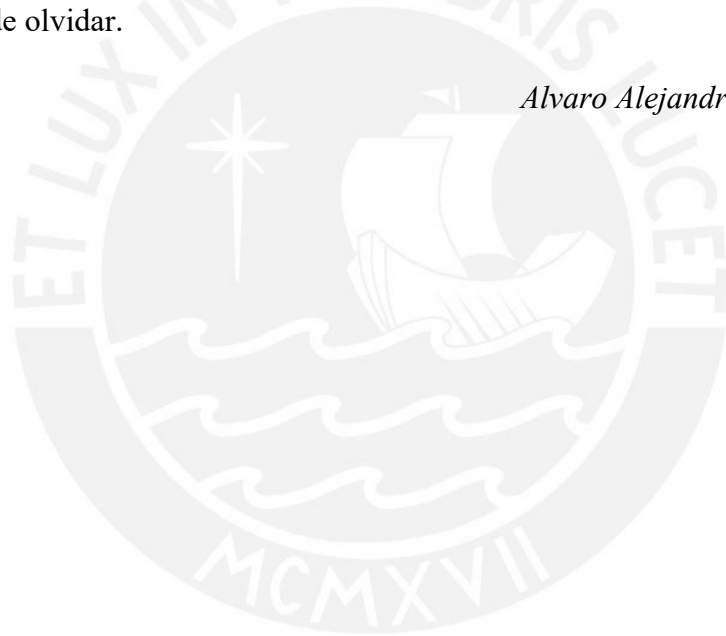
Keywords: Climate Change, Greenhouse Gas (GHG), Industrial ecology, Life-cycle assessment (LCA), roads, sustainable construction



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Javier y Rocío, por su confianza depositada en mi persona y su apoyo incondicional en los distintos ámbitos de mi vida durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, por ser mis principales fuentes de inspiración que me motivan a seguir adelante frente a cualquier adversidad. A mi hermana, Angela, por su cariño y aliento recibido para lograr cumplir siempre mis metas y proyectos. A mis abuelos, Fidel, Ignacia y Mercedes por el constante amor que me demuestran. A mi asesor y amigo, Ian Vázquez, quien gracias a sus enseñanzas y consejos me ayudó a finalizar satisfactoriamente esta etapa de mi vida. Finalmente, a mi alma máter, la Pontificia Universidad Católica del Perú, por haberme permitido conocer a los profesores y amigos que me acompañaron durante todos estos años de formación académica y por haberme permitido compartir momentos que serán difíciles de olvidar.

Alvaro Alejandro Elorrieta Mendoza



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. HIPÓTESIS.....	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Infraestructura vial.....	6
2.2. Infraestructura vial en Perú.....	8
2.3. Historia del ACV como herramienta de gestión ambiental en el sector de obras viales ...	11
2.4. ACV en carreteras y pavimentos en Perú	14
3. METODOLOGÍA.....	18
3.1. Descripción del caso de estudio.....	18
3.1.1. Características técnicas de la carretera.....	20
3.1.2. Características del pavimento de la carretera.....	21
3.2. Recopilación de datos	22
3.3. Aplicación del ACV mediante normativa ISO	24
3.3.1. Objetivos y alcance	25
3.3.2. Inventario de Ciclo de Vida	30
3.3.2.1. Construcción.....	32
3.3.2.2. Mantenimiento.....	37
3.3.2.3. Uso.....	39
3.3.2.4. Modelamiento de emisiones de partículas.....	41
3.3.3. Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida.....	49
3.3.4. Interpretación de resultados	57
3.3.5. Análisis de sensibilidad.....	57

3.4. Uso de software para el ACV	58
4. RESULTADOS	60
4.1. Carretera con mantenimiento	60
4.1.1. Etapa de construcción.....	60
4.1.2. Etapa de uso	61
4.1.3. Etapa de mantenimiento y rehabilitación	62
4.1.4. Sistema global	63
4.2. Carretera sin mantenimiento	64
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
5.1. Interpretación de resultados: Fase constructiva	66
5.2. Interpretación de resultados: Fase de mantenimiento	69
5.3. Interpretación de resultados: Fase de uso	70
5.4. Interpretación de resultados: Sistema global	72
5.5. Análisis de escenarios	78
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
7. REFERENCIAS	86

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio

Figura 2: Detalle del diseño geométrico del pavimento flexible para 10 años

Figura 3: Detalle del diseño del pavimento flexible para 10 años

Figura 4: Pasos necesarios para desarrollar un ACV

Figura 5: Límites establecidos del sistema 1 para la carretera Tacna-Collpa

Figura 6: Límites establecidos del sistema 2 para la carretera Tacna-Collpa

Figura 7: Elementos requeridos para el desarrollo de la EICV

Figura 8: Categorías de Impacto Ambiental según ReCiPe

Figura 9: Impactos ambientales por categoría de impacto

Figura 10: Comparación de emisiones de GWP con distintos estudios

Figura 11: Relación entre IMDA y emisiones de CO₂-eq de estudios de ACV (arriba).
Acercamiento de estudios superpuestos (abajo)

Figura 12: Impacto ambiental de GWP generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Figura 13: Impacto ambiental de PMF generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Figura 14: Comparación de PMF en la carretera con y sin mantenimiento

Figura 15: Impacto ambiental de TA generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Lista de tablas

Tabla 1: Parámetros de diseño de la carretera Tacna-Collpa

Tabla 2: ICV de materiales para la construcción de 52.235 km de carretera

Tabla 3: ICV de maquinaria para la construcción de 52.235 km de carretera

Tabla 4: Conjunto de datos principales de ecoinvent v3 utilizados para el modelamiento del ICV

Tabla 5: Maquinaria considerada en el ICV del mantenimiento de carretera

Tabla 6: Inventario de tráfico vehicular de la carretera en un año de operación

Tabla 7: Conjunto de datos de ecoinvent v3 utilizados para el modelamiento del ICV de uso vehicular

Tabla 8: Valores de factor k según rango de tamaño

Tabla 9: Peso ponderado de vehículos que transitan en la vía en un año

Tabla 10: Emisión por re-suspensión de material suelto en un año de flujo vehicular

Tabla 11: Valores de factor k, a y b según rango de tamaño

Tabla 12: Ratios de emisión por re-suspensión de material particulado durante construcción de la carretera

Tabla 13: Ratios de emisión por desgaste de frenos por tipo de vehículo

Tabla 14: Emisión por desgaste de frenos por tipo de vehículo en un año

Tabla 15: Ratios de emisión por desgaste de neumáticos por tipo de vehículo

Tabla 16: Emisión por desgaste de neumáticos por tipo de vehículo en un año

Tabla 17: Categorías de impacto seleccionadas para la EICV de la carretera Tacna-Collpa

Tabla 18: Descripción de cada escenario para el análisis de sensibilidad de la carretera

Tabla 19: Impactos ambientales de la construcción de 1 km de carretera para 1 año de operación

Tabla 20: Impactos ambientales del tráfico vehicular para 1 año de operación en 1 km de carretera

Tabla 21: Impactos ambientales del mantenimiento rutinario para 1 km de carretera en 1 año de operación

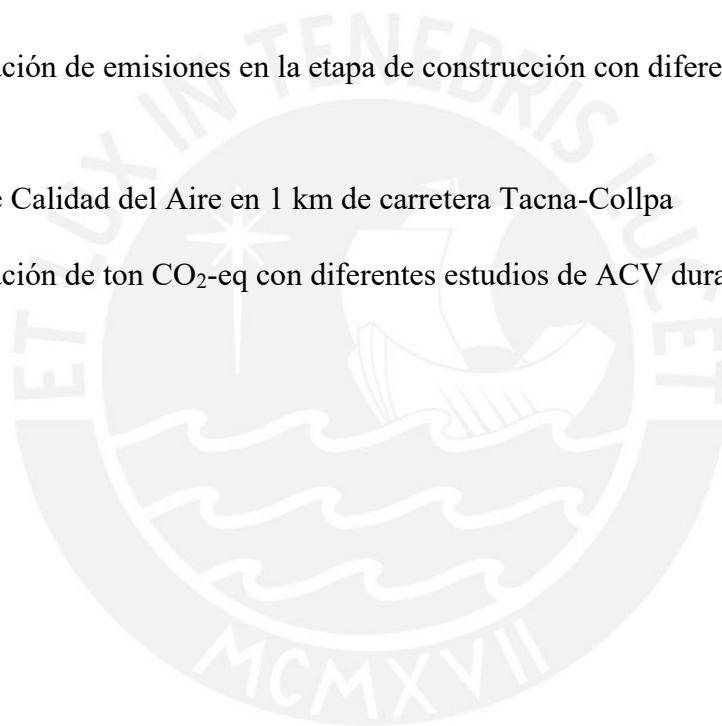
Tabla 22: Impactos ambientales totales para 1 km de carretera en 1 año de operación del escenario A

Tabla 23: Impactos ambientales totales para 1 km de carretera del escenario B1 en un año de operación

Tabla 24: Comparación de emisiones en la etapa de construcción con diferentes estudios de ACV

Tabla 25: Índice de Calidad del Aire en 1 km de carretera Tacna-Collpa

Tabla 26: Comparación de ton CO₂-eq con diferentes estudios de ACV durante todo el ciclo de vida.



1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras representan infraestructuras de gran importancia para el desarrollo económico y social de un país debido a que son utilizadas para el traslado de personas y/o productos en vehículos. Sin embargo, a pesar de su importancia para el desarrollo de la sociedad, en contraste producen un severo daño ambiental durante sus distintas etapas de vida. Solo en 2018, los sectores construcción y transporte fueron responsables del 30% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, donde el 16% fue producido por vehículos terrestres (WRI, 2019). En el caso de Perú, a pesar que el porcentaje de emisiones de ambos sectores disminuye a un 17%, continúa siendo un valor considerable para la contaminación ambiental (WRI, 2019).

La gran demanda de recursos y equipos para la construcción y mantenimiento de las carreteras generan un daño ambiental que varía de acuerdo al uso e importancia que tenga la vía. Si el mantenimiento no es el adecuado, el impacto ambiental durante el uso de las carreteras aumenta debido a que los costos operativos de los vehículos aumentan, debido a que utilizarán más combustible y generarán más emisiones (Burningham y Stankevich, 2005).

Para el año 2019, existía un aproximado de 64 millones de kilómetros de carreteras repartidas en todo el mundo y, posiblemente, este número seguirá en aumento durante los próximos años (SCMO, 2019). En Perú existen cerca de 170 000 km de carreteras repartidas en tres niveles: nacional, departamental y vecinal; donde aproximadamente solo 29 000 km de estas se encuentran pavimentadas (MTC, 2019a). Las carreteras pavimentadas en general tienen de estructura base al pavimento asfáltico, usando el asfalto como componente principal para su construcción, siendo este un material contaminante pues las mezclas asfálticas se trabajan en

temperaturas muy altas, generando GEI (Rubio et al., 2013). Además, el asfalto influye directamente en el consumo de combustible de los vehículos y sus emisiones (Balaguera et al., 2018).

En ese contexto, desde el año 2017, todos los proyectos viales en Perú requieren de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para ser ejecutados (MTC, 2017a). Las EIA tienen como objetivo establecer los efectos en el medio ambiente de algún proyecto o actividad que se tiene planeado ejecutar (MINAM, 2005). Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por temas presupuestales e insuficiencia de datos, lo que provoca que los resultados no se ajusten a la realidad (Verán-Leigh et al. 2019). Debido a esto, las medidas adoptadas para mitigar los impactos ambientales pueden resultar insuficientes en muchos casos.

En consecuencia, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) surge como una herramienta versátil y una alternativa que permite evaluar los posibles impactos ambientales ligados a un producto, desde su creación hasta el fin de uso. Esta metodología está siendo aplicada en el rubro de obras viales en diferentes países del mundo desde hace varios años construcción (Santero et al., 2010; Li et al., 2019; Liu et al., 2019). Esto permite tomar mejores decisiones en etapas previas a la construcción de la vía como el uso de materiales alternativos a los tradicionales como lo son el hormigón y asfalto (Chowdhury et al., 2010). No obstante, en Perú sigue siendo una herramienta reciente y su uso aún no está muy difundido. El propósito de esta tesis es aplicar la herramienta de gestión ambiental ACV en el tramo Km. 43+610 – Km. 94+000 de la carretera pavimentada Tacna – Collpa, una carretera de segunda clase perteneciente a la ruta PE-40, ubicada en una zona de producción agraria en la región Tacna que forma parte del proyecto de integración vial Tacna-La Paz. Se tomará en cuenta las etapas de construcción,

uso y mantenimiento, considerando dos escenarios: uno con buen mantenimiento y otro sin un mantenimiento adecuado.

1.1. JUSTIFICACIÓN

A pesar de que las carreteras son parte fundamental para el desarrollo económico y social en cualquier país, también representan a un potencial contribuidor de contaminación ambiental por todos los procesos que se llevan a cabo para su ejecución (Balaguera et al., 2018). A pesar que el sector de transportes y construcción representó el 12% del Producto Bruto Interno (PBI) de Perú en el año 2019, también fueron responsables del 17% de emisiones de GEI (INEI, 2020; WRI, 2019). En consecuencia, es necesario cuantificar los impactos ambientales que se producen durante todo el ciclo de vida de una carretera (Eskola et al., 2000).

El ACV aplica un método analítico e iterativo, que permite cuantificar los diferentes impactos ambientales de un producto o servicio en diferentes etapas de su ciclo de vida, el cual puede ser aplicado en sistemas complejos como las carreteras (Balaguera et al., 2018). Sin embargo, a pesar de su practicidad, esta herramienta aún está en su fase inicial de uso en Perú, enfocándose principalmente al sector industrial y agrícola, siendo escasos los estudios de ACV realizados en el sector vial. Esto resalta la necesidad de realizar estudios en carreteras sustanciales para Perú por ser posibles agentes contaminantes debido a su uso e importancia que tienen para el comercio y transporte terrestre. Debido a esto, se optó por la carretera Tacna – Collpa, ya que forma parte del proyecto de integración vial Tacna – La Paz entre los países de Perú y Bolivia, lo que la convierte en una importante ruta para el comercio bilateral, turismo y el tránsito de personas y productos entre ambos países (Gobierno Regional de Tacna, 2021).

Utilizando la metodología ACV, se busca cuantificar los impactos ambientales que produce el tramo de la carretera estudiada en su entorno. Asimismo, se espera determinar la influencia que tiene el adecuado mantenimiento en estos impactos, comparándolo con el caso de un mantenimiento deficiente o inexistente en la carretera. A partir de los resultados obtenidos de este análisis, se propondrán soluciones y alternativas sostenibles que permitan mitigar los impactos ambientales que se produjeron y producirán. Se espera que estas soluciones se utilicen como referentes en la ejecución de nuevas obras viales y en el mantenimiento de las ya existentes en el territorio peruano, promoviendo la construcción sostenible. Asimismo, contribuirán a un mejor desarrollo socio-económico de la población de la zona en estudio.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo general:

Calcular el impacto ambiental, usando la metodología ACV, de la construcción, uso y mantenimiento de un tramo de la carretera Tacna - Collpa, comparando un escenario con buen mantenimiento de la vía y otro sin un mantenimiento adecuado

Objetivos específicos:

- Identificar las etapas del ciclo de vida de la carretera y establecer el alcance del sistema bajo estudio.
- Recolectar información que permita establecer los flujos de materia y energía relacionados con la vía en ambos escenarios.
- Realizar el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la carretera en ambos escenarios, tomando en consideración las normativas actuales y los datos obtenidos del proyecto.

- Analizar los impactos ambientales producidos por la carretera en cada escenario, mediante el uso del software SimaPro.
- Comparar los resultados obtenidos en ambos escenarios planteados.
- Plantear soluciones ambientales según los resultados obtenidos mediante las diferentes categorías de impacto ambiental.

1.3. HIPÓTESIS

Esta tesis pretende demostrar dos hipótesis:

- La etapa de uso del tramo de la carretera estudiada genera los mayores impactos ambientales durante todo el ciclo de vida de esta.
- El mantenimiento deficiente de la carretera genera mayores impactos ambientales en el entorno de la carretera, a comparación del mantenimiento adecuado en la misma vía.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Infraestructura vial

La infraestructura vial son todos los elementos que conforman una vía, permitiendo el desplazamiento mediante vehículos a un lugar determinado (MTC, 2006). Abarca todas las instalaciones, servicios y componentes necesarios para el funcionamiento de los vehículos por una autopista, carreteras y calles (MTC, 2017b). Su importancia radica en la relación directa que posee con el desarrollo económico de un país. Una red vial eficiente permite tener una ventaja estratégica y económica en el transporte de mercancías. Por ejemplo, Estados Unidos destinaba 84% de su presupuesto para transportes al sector terrestre en 1991 (Queiroz y Gautam, 1992). En contraste, los países en vías de desarrollo a menudo encuentran barreras en la comercialización de productos y servicios en los diferentes sectores económicos debido al deficiente estado de la mayoría de sus vías (Queiroz y Gautam, 1992). Esto demuestra que la infraestructura vial no solo permite el crecimiento económico, sino también, revelan las brechas sociales que existen en diferentes realidades (Meijer et al., 2018).

Dentro de los elementos que conforman la infraestructura vial, las carreteras son, probablemente, las más abundantes e importantes. Como se explicó anteriormente, estas son esenciales para el desarrollo económico de cualquier país, debido a que permite obtener recursos, abrir nuevos mercados y generar empleos (Meijer et al., 2018). Las ventajas de las carreteras no solo abarcan el ámbito económico, también permiten el acceso a zonas rurales que se ven restringidas por su orografía, brindando el acceso a servicios básicos como salud y educación (Balaguera et al., 2018).

Respecto a la construcción de carreteras, la ejecución de estos proyectos es compleja por la influencia de varios factores como la ubicación geográfica, el diseño vial, la obtención de recursos y equipos, entre otros (Balaguera et al., 2018). La estructura principal y usual que se utiliza en estas es el pavimento asfáltico, el cual se subdivide en pavimento rígido o flexible, los cuales constan de las siguientes partes: carpeta asfáltica, base, sub-base y subrasante (MTC, 2013). Los pavimentos se componen de asfalto, betún, agregados, agua y usualmente aditivos, dependiendo de las solicitudes del proyecto (Hernández et al., 2001). A este sistema lo complementan los túneles, puentes, badenes, obras de arte y drenaje, señalización, las cuales incluyen señalizaciones, pinturas y otros componentes que conforman parte del inventario vial (MTC, 2006).

Como se indicó anteriormente, la complejidad de estos proyectos y los materiales que se usan, la construcción y uso de las carreteras generan altas emisiones de GEI como el dióxido de carbono, afectando la salud de los habitantes y el ecosistema local (Creutzig, 2015). Solo en el año 2016, el 12% de las emisiones de GEI a nivel mundial correspondieron al transporte terrestre, incrementándose hasta un 17% en el 2018 (WRI, 2020). Uno de los elementos más contaminantes es el asfalto, debido a que las mezclas asfálticas se trabajan en altas temperaturas durante el proceso constructivo y producen altas emisiones provenientes del asfalto que, al ser el principal insumo en las carreteras, no solo contaminan al aire, sino también al agua y tierra, sin considerar el proceso de obtención de este (Hernández et al., 2001). Además, se tiene que agregar a estas emisiones, las que serán generadas por los vehículos que usarán la carretera y la maquinaria durante la construcción, los futuros mantenimientos periódicos e incluso rehabilitaciones (Arroyave et al., 2006).

El contexto actual en el que vivimos; la globalización, sostenibilidad y el cambio climático, representan un desafío para la infraestructura vial actual y futura que debe adaptarse a estos cambios constantes debido a que se estima que el transporte de mercancías por cualquier medio será del 75% mediante carreteras hasta, por lo menos, el año 2050 (Auerbach et al., 2011). De este modo, los estudios medioambientales en la infraestructura vial resultan importantes y necesarios que se sigan realizando y, de este modo, buscar la forma en reducir al mínimo los impactos adversos al medio ambiente de las carreteras actuales y futuras como, por ejemplo, priorizando la búsqueda y uso de materiales alternativos sostenibles durante la construcción, mantenimiento y rehabilitación de las carreteras.

2.2. Infraestructura vial en Perú

Para el año 2019, Perú poseía un aproximado de 170 000 km de carreteras que se encontraban distribuidas a nivel nacional, departamental y vecinal; donde solo el 17% se encontraba pavimentada (MTC, 2019a). Dentro de este valor, aproximadamente 27 000 km de carreteras pertenecen a la denominada la Red Vial Nacional (RVN) y solo el 70% de estas se encuentran en buen estado, incluyendo carreteras pavimentadas y sin pavimentar (Provías Nacional, 2019a). Este bajo porcentaje, si se compara con la infraestructura vial de otros países de la región, se debe a que las carreteras peruanas sufrieron un deterioro considerable desde 1983 hasta inicios del 2000 debido a la escasa inversión por parte de los gobiernos centrales en proyectos de rehabilitación y mantenimiento, producto de la crisis económica y el contexto social que se presentaba en esos años en Perú (Instituto Peruano de Economía, 2008). Esta problemática aún persiste en la actualidad, pues solo el 82% de la RVN se encontraba pavimentada en 2019, un 6% menor al que se tenía proyectado en el 2016 (MTC, 2016).

El sector transporte representa un importante aporte para el desarrollo de la economía peruana. Según el INEI, en 2019 este sector representó cerca del 6% del PBI en Perú, siendo el sexto sector de catorce con más aporte, y si se incluye al sector construcción, este porcentaje aumenta a 12% (INEI, 2020). Durante los últimos años, se ha observado un incremento en la ejecución de proyectos viales a nivel nacional por parte del Gobierno peruano, con inversiones de hasta 24 millones de dólares, esto con el objetivo de reducir los costos logísticos de los productos de exportación y dinamizar el comercio interno (MTC, 2021a, 2021b). Es por ello que el Gobierno peruano estableció varios objetivos para la mejora de la infraestructura de transporte como la construcción de 15 000 km de carreteras mediante el programa “ProRegión”, la pavimentación del 90% de la red nacional y del 70% de la red departamental para el año 2021 (MTC, 2019b, 2021b). Sin embargo, en 2020 solo se logró ejecutar 264 km de carreteras pavimentadas a nivel nacional debido a la paralización de obras y las restricciones de desplazamiento que perduraron durante varios meses debido a la pandemia por COVID-19 (Provías Nacional, 2021).

En lo que respecta al diseño y construcción, las carreteras peruanas son diseñadas en función al “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico-DG 2018”, un documento normativo donde se establecen los criterios, normas, guías y procedimientos para el correcto diseño vial en base a parámetros, priorizando la seguridad vial y preservación ambiental (MTC, 2018). Por otro lado, los criterios y procedimientos de construcción y mantenimiento se establecen en el “Manual de Especificaciones técnicas generales para construcción”, documento donde se detalla los procesos constructivos, materiales empleados y tecnologías que se deben usar durante las etapas de construcción, mantenimiento y rehabilitación, dependiendo de las particularidades y condiciones climáticas del terreno donde se quiere llevar a cabo el proyecto (MTC, 2013). Estos manuales se complementan en el “Reglamento Nacional de Gestión de

Infraestructura Vial'', documento donde se encuentran todas las normativas vigentes en materia de infraestructura y seguridad vial para el correcto uso y funcionamiento de toda la infraestructura vial en Perú (MTC, 2006).

Como se explicó anteriormente, los proyectos de carreteras en Perú también tienen un contrapeso en el ámbito ambiental por la alta emisión de GEI y contaminación en general que producen durante todo su ciclo de vida. Según los datos del World Resources Institute, las emisiones de GEI producto de los transportes y la construcción fue de 17% durante el año 2019 (WRI, 2020). En este contexto del aumento de emisiones de GEI, los Ministerios de Ambiente (MINAM) y de Transportes y Comunicaciones (MTC) determinaron que todos los proyectos de infraestructura vial en Perú requieren de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para ser aprobados y ejecutados (MTC, 2017a). Sin embargo, las EIA resultan deficientes en Perú por la inadecuada fiscalización existente por parte del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) debido a que solo se limitan a determinar si existe suficiente información del proyecto y la zona de estudio, mas no si el daño ambiental es mínimo o severo (Cuya, 2013; Chapa, 2016). Además, también persiste el problema del nivel de detalle requerido, ya que en muchos casos se ve limitado por temas presupuestales y cumplimiento de plazos, provocando resultados erróneos (Verán-Leigh et al. 2019). Esta problemática no solo produce que los daños ambientales perduren con el pasar de los años, a pesar de que exista una normativa vigente, también puede producir conflictos sociales como el caso del proyecto minero Las Bambas (Aguirre, 2017).

En consecuencia, se debe optar por una herramienta de gestión ambiental que logre cuantificar los impactos ambientales que generan las carreteras y proyectos viales en general. Los organismos competentes deben mejorar los procesos de fiscalización e incluir criterios como

la cuantificación de los impactos ambientales durante todo su ciclo de vida. La infraestructura vial en Perú seguirá en crecimiento durante los próximos años, lo cual beneficia a todos sus ciudadanos en el ámbito socio-económico, pero estos proyectos deben ir acompañados de un adecuado estudio ambiental.

2.3. Historia del ACV como herramienta de gestión ambiental en el sector de obras

viales

El ACV se define como la recolección y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida (ISO, 2006a). Una de las fortalezas del ACV es que se aplica en base a la función del producto y no en sus características, haciendo posible el análisis comparativo de dos productos con rasgos distintos (Buyle et al., 2013). Desde sus primeras aplicaciones en pequeños productos a inicios de 1970, el ACV ha evolucionado, lográndose aplicar en diversos campos de estudio lo cual dio como resultado que se crease una metodología estándar que actualmente se encuentra en las normativas ISO 14040 e ISO 14044 (Guinée et al., 2011).

Sin embargo, la normativa existente fue creada para enfocarse, principalmente, a productos manufacturados en el sector industrial y no en sistemas complejos como las carreteras por lo que resulta complicado, debido a las características particulares de las carreteras y sus procesos no estandarizados en la norma, realizar un correcto estudio de ACV en el rubro de la infraestructura vial (Jiang y Wu, 2019). Los estudios de ACV requieren de una unidad funcional, así también objetivos, alcances y límites establecidos según la normativa ISO (ISO, 2006a, 2006b). Estos requerimientos son difíciles de estandarizar en las carreteras y pavimentos, pocos de los autores de las investigaciones de ACV de este sector coinciden en

los parámetros seleccionados pues, como no existe un criterio estándar para las carreteras, queda a criterio del investigador elegirlos.

En el año 1996 se datan los primeros estudios de ACV realizados en carreteras y pavimentos, no obstante, este campo aun no llega a estar tan desarrollado a comparación de otros sectores como el agrícola o industrial en la actualidad. Los finlandeses Häkkinen y Mäkelä (1996) realizaron un estudio comparativo entre un pavimento asfáltico tipo Stone-Mastic Asphalt (SMA) y un pavimento de concreto simple con juntas (JPCP) en Finlandia. A pesar de ser uno de los primeros estudios de ACV de carreteras y pavimentos, es uno de los estudios más completos y detallados pues incluye todas las etapas del ciclo de vida a excepción del fin de vida (Santero et al., 2010). La investigación realizada fue con un enfoque de procesos, abarcando las etapas de materiales, construcción, uso y mantenimiento y rehabilitación. Además, se consideró un periodo de 50 años, utilizando la unidad funcional de 1 km de carretera. Dentro de los resultados que obtuvo la investigación, se determinó que el pavimento de concreto es más contaminante en 40% a 60% que el pavimento de asfalto, dependiendo del tipo de mantenimiento. En contraste, si se considera el proceso de obtención del betún, el pavimento asfáltico consume el doble de combustible que el de concreto (Santero et al., 2010).

Desde entonces, la metodología ACV empezó a ser utilizada en las carreteras y pavimentos, principalmente en países de Europa y Norteamérica, así como en Australia y Corea del Sur (Inyim et al., 2016). Carlson (2011) describe los estudios más relevantes de Europa desde el estudio de Häkkinen y Mäkelä en 1996. La autora concluye que los estudios no pueden ser directamente comparables por los enfoques y consideraciones que tiene cada uno como el periodo de utilidad, la unidad funcional o las categorías de impacto seleccionadas. Además, se encontró que todas las carreteras tienen características únicas y que el mayor uso de energía se

da durante el tráfico a comparación de las etapas de construcción, mantenimiento y rehabilitación (Carlson, 2011).

Por otro lado, Balaguera et al. (2018) se enfoca en la comparación del uso de materiales alternativos frente a los tradicionales en la construcción de carreteras en ACV realizados mayoritariamente en Estados Unidos y países de Europa. Se encontró que el material alternativo más común fue el reciclado de asfalto, las cenizas volantes y los polímeros. En los estudios que analizó Balaguera et al., las categorías de impactos más comunes fueron el consumo de energía y el potencial de calentamiento global (GWP). Además, los beneficios de usar los materiales reciclados fueron que se evita su deposición en vertederos y se reduce la energía de transformación para que sean materiales aptos para procesos constructivos. Asimismo, la mayoría de las carreteras en estudio poseían un alto volumen de vehículos por lo que sugiere que se deben realizar estudios en países en vías de desarrollo ya que poseen características distintas como menor volumen de tráfico, carreteras sin pavimentar en la mayoría de casos y diferentes consecuencias económicas y sociales (Balaguera et al., 2018).

Finalmente, Jiang y Wu (2019) realizan una compilación de 94 ACV realizados en el periodo 2003-2018, enfocándose en analizar las barreras y complicaciones que presentan los ACV aplicados a carreteras y pavimentos como la falta de una unidad funcional común o los alcances y límites establecidos. Se encontró que el enfoque de ACV híbrido, es decir combinar el ACV de procesos con el de insumo-producto, ha estado adquiriendo mayor notoriedad en los últimos años a pesar de la aún predominancia del ACV basado solo en procesos. Asimismo, se identificó que existe un inadecuado reporte de datos, así como la nula existencia de análisis de sensibilidad e incertidumbre. Además, la mayoría de estudios se limitan solo al análisis de un tramo de carretera y rara vez de una red vial completa lo que, si bien es comprensible por

factores económicos, puede dificultar una mejor planificación y gestión de la infraestructura vial de un país; agregándole el hecho de que no se toma en consideración la variante del tiempo en la carretera (Jiang y Wu, 2019).

Durante los últimos 20 años, los estudios de ACV se han caracterizado por su enfoque en la comparación de diferentes materiales para su construcción, buscando uno menos contaminante que el concreto y asfalto (Inyim et al., 2016). Asimismo, estos estudios tienen la tendencia por el uso del ACV de procesos o el de Insumo-Producto (EIO-LCA), aunque recientemente existe una mayor afinidad a metodologías menos costosas y más completas como el ACV Híbrido (Jiang y Wu, 2019). No obstante, esto va acompañado de una serie de obstáculos como la falta de una estandarización del proceso en carreteras como el uso variado de unidades funcionales o la falta de análisis propios del procedimiento (Jiang y Wu, 2019). Actualmente, en los países desarrollados, el ACV es una herramienta muy utilizada en la construcción de carreteras para tratar de reducir los impactos ambientales que estas producen y buscar el uso de alternativas sostenibles como el reciclado de materiales durante su etapa rehabilitación y mantenimiento (Huang et al., 2009). No obstante, al tener mayoritariamente bases de datos solo de países desarrollados, los resultados generados para carreteras en países en vías de desarrollo pueden diferir de su situación real, generando un obstáculo adicional para el desarrollo de ACVs de carreteras en estos lugares (Verán-Leigh et al., 2019).

2.4. ACV en carreteras y pavimentos en Perú

En general, el campo de estudios de ACV en Perú está aún en fases iniciales de desarrollo. La Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN) es un grupo de investigación que ha realizado la mayoría de estudios con esta metodología en territorio peruano (PELCAN, 2021). El enfoque de PELCAN ha sido principalmente del ámbito industrial y agrario. En 2019,

con el apoyo del MINAM y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), lanzaron la página web PERÚ LCA donde se encuentra la base de datos peruana y sirve como interconexión con la plataforma mundial de Global LCA Database (GLAD). Además de poseer la base de datos, también se encuentran publicadas investigaciones de libre acceso, divididas en sectores económicos como agricultura, energía o transportes y asociadas con las matrices ambientales de emisiones de GEI y extracción de agua (Vázquez-Rowe et al., 2019).

A pesar de su constante uso actual en carreteras en el mundo, los estudios de ACV en Perú aplicados a este sector son escasos ya que a la fecha se tiene registro de sólo tres estudios de este tipo. El primer estudio de este tipo en Perú es de Larrea-Gallegos et al. (2017), el cual aplica esta metodología en el tramo de 46 km de una carretera sin pavimentar en construcción ubicada en las cercanías del Parque Nacional Manu, Madre de Dios. En esta investigación se hace énfasis en la expansión de caminos ilegales en el Amazonas, producido por la minería ilegal abundante en la selva peruana, provocando que las áreas naturales protegidas se encuentren en una situación de vulnerabilidad. En este caso, las emisiones de GEI generadas por la construcción fueron de 33 ton CO₂-eq, superando ampliamente las 3.7 ton CO₂-eq de la etapa de uso debido a la poca afluencia de vehículos que existe en la zona. La deforestación, el cambio de uso del suelo y las emisiones de polvo fueron los principales causantes por las condiciones geográficas de la zona. Al compararse con otros estudios de diferentes países, lo usual era que la fase de uso sea la de mayor impacto ambiental, sin embargo, en las carreteras de la Amazonía suele ser menor a la de construcción ya que no se encuentran pavimentadas y se realiza la tala de bosques para su ejecución (Larrea-Gallegos et al., 2017).

Asimismo, Verán-Leigh et al. (2019) realiza un ACV sobre un tramo de 22,4 km de la autopista Panamericana Sur en una zona árida en la provincia de Lima, una de las más importantes carreteras de Perú de transporte de personas y mercancías debido a que atraviesa todos los departamentos costeros. Según los autores, es el primer estudio en América Latina en el que se analizan los impactos ambientales de una autopista siguiendo la metodología ACV. Los resultados arrojaron que la etapa de uso es la que genera mayores impactos ambientales durante todo el ciclo de vida de la carretera, contribuyendo al 98% en las categorías de impacto evaluadas. Los principales causantes identificados en este análisis fueron la combustión de los motores de vehículos y la emisión de partículas a lo largo de la vía. Además, se comparó con diferentes escenarios de la literatura revisada donde todos los casos superaban el 89% de emisiones totales generadas durante la etapa de tráfico. También se concluyó que los resultados fueron uno de los más altos registrados en la literatura por la problemática de congestión vehicular en Lima y la gran cantidad de vehículos obsoletos presentes en Perú (Verán-Leigh et al., 2019).

Por último, Biberos-Bendezú y Vázquez-Rowe (2020) realizan un análisis comparativo de los impactos ambientales de las dos formas de transporte existentes para llegar al Complejo Arqueológico de Kuelap: la carretera sin pavimentar AM-111 y el sistema de teleféricos que funcionan desde 2017. Los resultados obtenidos determinaron una completa superioridad y un mayor beneficio del sistema de teleféricos frente a la carretera sin pavimentar, esto debido principalmente a las condiciones orográficas del lugar. Los impactos ambientales se redujeron considerablemente en la mayoría de categorías de impacto, las cuales fueron seis, a excepción de la eutrofización del agua dulce. Las emisiones de GEI fueron reducidas hasta en un 80% y la formación de partículas finas a un 95%, mientras que las demás categorías poseían un rango

de reducción entre el 80%-90%. Además, se realizó una comparación en distintos escenarios como el uso de matriz energética nacional o el uso de buses eléctricos donde el sistema de teleféricos sigue siendo el más beneficioso. El estudio llegó a la conclusión que, si bien el impacto ambiental se redujo considerablemente, no se puede asegurar que permitirá mitigarlos completamente. Esto se debe a que trae consigo daños ambientales adicionales, además que se tuvo un mayor enfoque en las categorías de impacto que afectan la salud humana (Biberos-Bendezú y Vázquez-Rowe, 2020).

En los tres casos mencionados, se utilizó como base de estudio la metodología estipulada en la normativa ISO y se realizó una comparativa con distintos escenarios de otras investigaciones realizadas en años anteriores en distintos países, principalmente Europa y Norteamérica. La principal dificultad que enfrentaron los estudios fue que las bases de datos contenían información referente a Europa, sin tomar en cuenta la realidad latinoamericana y peruana, como el mayor uso de vehículos obsoletos, lo que puede generar que los resultados reales de los impactos ambientales sean completamente superiores. Lo común que se encontró en los casos de estudio fue el uso de 1 km de carretera como la unidad funcional, así como abarcar las etapas de construcción, uso y mantenimiento y rehabilitación como etapas del ciclo de vida. Debido a que Perú posee una variedad de climas y terrenos, los resultados varían dependiendo del lugar de estudio como se observó en los estudios de ACV mencionados. Estas investigaciones servirán como antecedentes para nuestro estudio y resaltarán la utilidad de las normas ISO para el campo de la infraestructura vial en Perú.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se utiliza en esta investigación es una de carácter cuantitativo y cualitativo. En líneas generales, se realizará el ACV del primer tramo de la carretera que articula Perú con Bolivia en la región de Tacna, Perú; siguiendo los lineamientos de las normativas ISO como se indicó anteriormente. Se explicará en este capítulo los principales requisitos y procedimientos requeridos a realizarse que estipulan las normas ISO para una correcta evaluación del estudio. Asimismo, se incluirá de forma paralela los datos propios de la investigación en curso para poder desarrollar de una mejor forma los resultados en el capítulo siguiente.

3.1. Descripción del caso de estudio

El objeto de estudio de esta investigación es el subtramo: Km. 43+610 – Km. 94+000 del proyecto vial de la carretera Tacna – Collpa (Frontera con Bolivia), que forma parte del proyecto de integración vial Tacna – La Paz. Forma parte de la Ruta PE-40 de la Red Vial Nacional localizado en el extremo sur del Perú y se encuentra íntegramente en la región de Tacna. Antes de la construcción del tramo, la ruta consistía en una superficie de rodadura conformada en su mayoría por grava natural con una clasificación variable. El tramo anterior a este, Km. 23+700 – Km. 43+610, es una carretera con una superficie de rodadura pavimentada del tipo “Tratamiento superficial de bicapa”. El tramo estudiado tiene inicio en el desvío del pueblo de Piculla y finaliza en las afueras del poblado de Palca, adyacente a la frontera con Chile.

El proyecto vial comenzó a construirse en agosto de 2016 y fue culminado en noviembre de 2019 (Provías Nacional, 2019b). Actualmente se encuentra en servicio, pavimentada y cuenta con dos carriles, además de contar con mantenimiento rutinario anual (COSIPLAN, 2017).

Respecto a su condición geográfica, desde el Km. 30+000 la orografía presente es una zona montañosa, siendo la carreta colindante a laderas con taludes de corte considerablemente altos en la casi totalidad del tramo. En la parte final del tramo estudiado, específicamente desde el Km. 86+000, se presenta un terreno plano ondulado.

La zona próxima al inicio de proyecto, presenta una precipitación anual promedio de 40 mm. La precipitación en el centro poblado de Palca alcanza a 80 mm y la zona próxima al campamento minero alcanza una precipitación de 100 mm. En el recorrido del subtramo del Km. 43+610 al Km. 94+000, la altitud varía desde los 2,300 m.s.n.m hasta los 4,700 m.s.n.m.

Los principales vehículos que circulan por esta vía son camiones de carga que tienen como origen y destino los departamentos de Arequipa, Cusco, Puno y Tacna. Es un punto de conexión importante para las zonas de costa y sierra en Perú debido a que varias carreteras secundarias, caminos vecinales y trochas son ramificadas de esta vía principal para llegar a diferentes zonas agrícolas de Tacna principalmente, como se observa en la Figura 1.

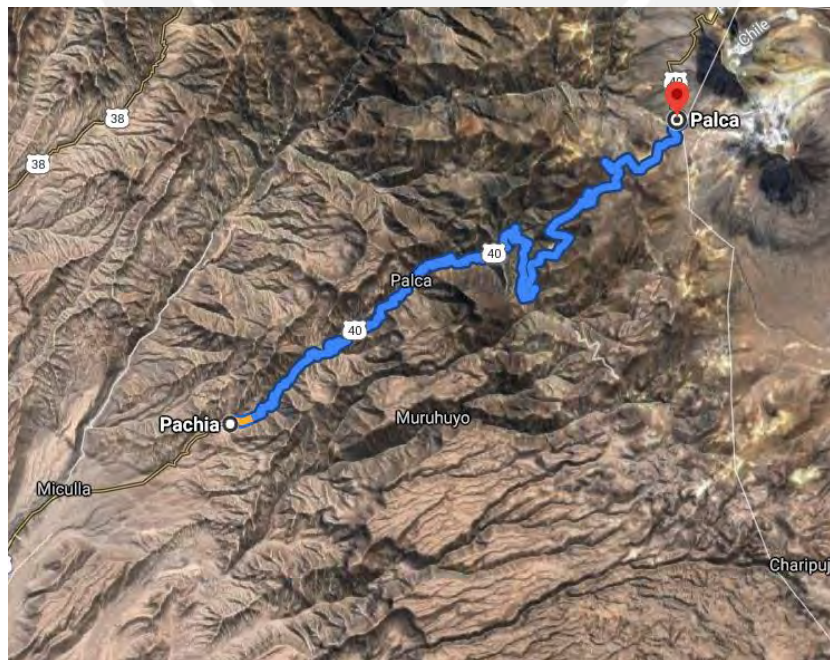


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Google Maps, 2021

3.1.1. Características técnicas de la carretera

El proyecto, basándose en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico-DG 2018 (MTC, 2018), tiene una intensidad media diaria de tráfico anual (IMDA) de 561 veh/día, donde la mayoría de vehículos que transitan son vehículos ligeros con un 38% y tiene una tasa de crecimiento del tráfico anual del 3% aproximadamente hasta el año 2037, por lo que se clasifica como una carretera de *segunda clase*. Además, por su orografía, es considerada tipo 3 y 4 a lo largo de todo su trayecto debido a que atraviesa zonas accidentadas a muy accidentadas y con pendientes mayores a 6%. Además, las velocidades de diseño utilizadas en diferentes tramos del trayecto fueron de 30-60 km/h.

La carretera cuenta con dos carriles de 3.30 metros cada uno, un ancho de berma de 1.20 m en cada lado, un sobreaño de compactación de 0.50 m en cada lado, un talud de relleno de 1.50H : 1V y cunetas triangulares de 0.75 x 0.30 como se observa en la Figura 2.

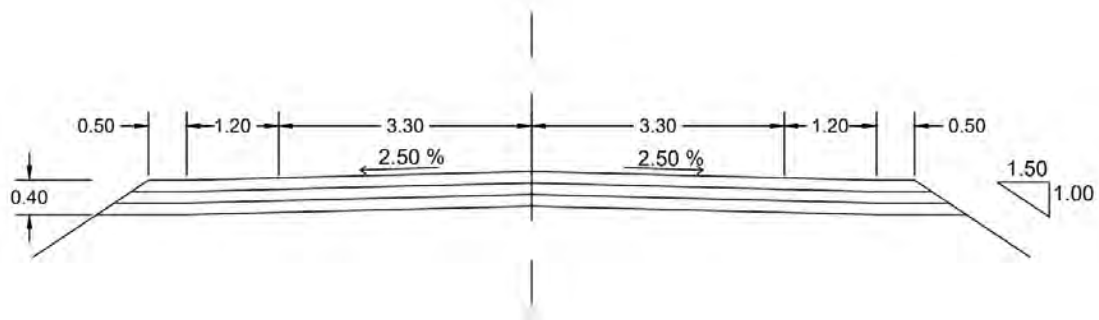


Figura 2: Detalle del diseño geométrico del pavimento flexible para 10 años

Fuente: Propia

Tabla 1.

Parámetros de diseño de la carretera Tacna-Collpa

Descripción	Valor	Unidad
Extensión total	52.235	km
IMDA	561	Veh/día
Tipo	Segunda clase	-
Orografía	Tipo 3 y 4	-
Velocidad de diseño	30-60	km/h
Ancho de calzada	6.60	m
Ancho de berma	1.20	m/lado
Sobreancho	0.50	m/lado
Talud de relleno	1.5H:1V	-
Cunetas triangulares	0.75 x 0.30	m

3.1.2. Características del pavimento de la carretera

Para el diseño del pavimento del proyecto, se tomó la metodología AASHTO 1993, considerando un valor de Ejes Equivalentes de Carga (EAL) de 8.28 toneladas y los datos obtenidos de los estudios de tráfico, suelos, topografía, etc. Como resultado se obtuvo un pavimento flexible que, a diferencia del pavimento rígido, sus tres capas cumplen la función estructural de transmitir las cargas de los vehículos gradualmente (Montejo, 1998). Este pavimento flexible está compuesto de carpeta asfáltica (9 cm), base granular (15-17.5 cm) y sub base granular (15-25 cm). En la Figura 3 se muestra el diseño del pavimento flexible del caso de estudio.

Asimismo, esta carretera requirió la aplicación de ciertos productos bituminosos para su construcción como la imprimación asfáltica y el cemento asfáltico. En primer lugar, la imprimación asfáltica consiste en colocar un ligante asfáltico a una superficie sin material

bituminoso para que pueda recibir tratamiento asfáltico de cualquier tipo sin inconvenientes, en este caso se utilizó asfalto líquido MC-30. Por otro lado, el cemento asfáltico es un ligante más denso que ofrece impermeabilidad y durabilidad, clasificándose de acuerdo al grado de penetración siendo 85/100 el más utilizado y el que se aplicará en este proyecto como riego de liga en base a los requisitos de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del Manual de Carreteras (Montejo, 1998; MTC, 2013).

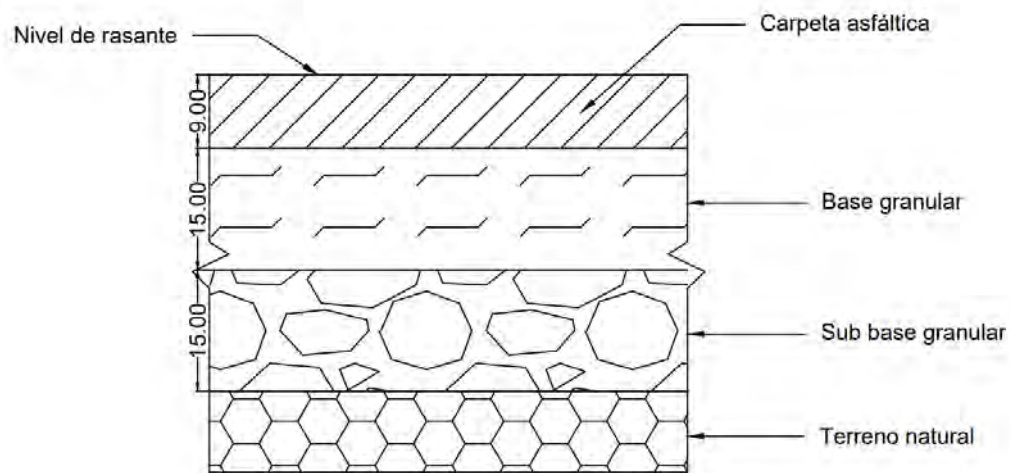


Figura 3. Detalle del diseño del pavimento flexible para 10 años

Fuente: Propia

3.2. Recopilación de datos

La recolección de datos depende de los objetivos planteados y los procesos unitarios seleccionados en la fase de objetivos y alcances del ACV. Usualmente en las aplicaciones de ACV, la recopilación de datos son una mezcla de datos medidos, calculados y estimados. Asimismo, la calidad de los datos debe abarcar el contexto temporal, geográfico y tecnológico (ISO, 2006b). La EPD International ha clasificado los datos en primarios, secundarios y

terciarios. Los primarios consisten en la información de primera mano que se consigue mediante encuestas e investigaciones a campo; los secundarios son la literatura revisada e informes ambientales y bases de datos comerciales; finalmente, los terciarios son estimaciones estadísticas (Jiang y Wu, 2019). Es necesario agregar la incertidumbre de los datos debido a las limitaciones de las bases de datos disponibles pues la mayoría de estudios analizados se realizaron en países desarrollados con bases de datos propias lo que supone una limitación para el estudio de ACV que se realiza en un país en desarrollo como Perú (Inyim et al.,2016).

Para la investigación, la información primaria obtenida para las etapas de construcción, uso y mantenimiento; consistió en el estudio definitivo de la carretera para su ejecución en 2014 y el informe de mantenimiento realizado en 2021. Asimismo, se estableció contacto con personal involucrado directamente en el proyecto que permitió obtener un mejor entendimiento de los datos primarios. En el estudio definitivo se incluyeron los metrados de los materiales y equipos para su etapa de construcción, los estudios de tráfico también estuvieron incluidos que sirvieron para la etapa de uso; mientras que el informe de mantenimiento incluyó los metrados de materiales utilizados. La información secundaria y terciaria fueron los datos obtenidos de informes del Gobierno peruano y el Gobierno regional de Tacna, así como el uso de la base de datos ecoinvent.

Debido a los puntos mencionados, puede afirmarse que la calidad de los datos es altamente confiable pues fueron obtenidos de forma directa de la empresa contratista encargada de la ejecución de la carretera. Una limitación que se puede encontrar es el uso de una base de datos ajena a la realidad peruana, así como la obtención de datos para la etapa de extracción y los datos de consumo de combustible que tuvieron que ser estimados u obtenidos de información estadística a nivel nacional.

3.3. Aplicación del ACV mediante normativa ISO

El ACV es una herramienta de la gestión ambiental de proyectos que permite evaluar los impactos ambientales de un producto de una forma amplia que puede ser utilizada de manera complementaria a otras herramientas como las EIA. La presente investigación basó su metodología en las normativas ISO 14040 y 14044. Cabe destacar que no existe un solo tipo de ACV pues varían de acuerdo a la orientación de la investigación y los objetivos que se quieran lograr con ella (Buyle et al., 2013).

Según la normativa ISO 14040, se define al ACV como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (ISO, 2006a). El ACV consta de cuatro fases fundamentales: definición de los objetivos y alcances del estudio, análisis de inventario, evaluación de impactos ambientales e interpretación de resultados. Como se observa en la Figura 4, la etapa de interpretación está presente desde la primera fase, durante todo el proceso, debido a que el ACV es un proceso iterativo donde se obtiene y se adiciona nueva información durante toda la investigación (ISO, 2006a).

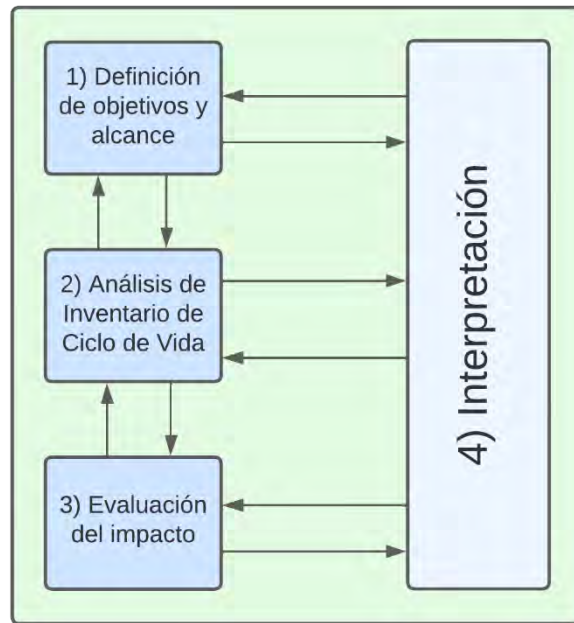


Figura 4: Pasos necesarios para desarrollar un ACV

Fuente: Adaptación de ISO, 2006a

3.3.1. Objetivos y alcance

Es la primera fase de la metodología ACV donde se establecen la unidad funcional, los objetivos del estudio y las fases del ciclo que serán tomadas en consideración. Los objetivos son el soporte primordial para la obtención y definición de la unidad funcional, la fuente primaria de datos y los límites del sistema (Loijos et al., 2013). Usualmente la mayoría de objetivos de los ACV en pavimentos y carreteras son: la evaluación de los impactos ambientales producidos, la comparación de diseños y la búsqueda de materiales alternativos; siendo analizados a nivel de proyecto (Jiang y Wu, 2019). Es importante resaltar que el periodo de análisis tiene una influencia relevante en los resultados debido al consumo de energía y combustible que se producen en la fase de uso (Li et al., 2019). Finalmente, se debe especificar las limitaciones y supuestos de la evaluación para una mayor confiabilidad en los resultados, así también como la calidad de los datos (Li et al., 2019).

Para el presente estudio, los objetivos planteados son evaluar y comparar el consumo de energía y las emisiones de GEI de un tramo de 50 km de la ruta PE-40 en la región Tacna en dos circunstancias: un escenario con buen mantenimiento de la vía y otro sin un mantenimiento adecuado o inexistente; y recomendar posibles medidas de mitigación para reducir los impactos ambientales. Además, el ACV desarrollado en cuestión será uno basado en procesos y el periodo de análisis será de 10 años debido a que se agregará una carpeta asfáltica de refuerzo finalizando ese periodo. Esta investigación es dirigida a la empresa concesionaria ICCGSA y Provias Nacional para que tomen conocimiento de los efectos ambientales durante las etapas de construcción, uso y posteriores mantenimientos periódicos de la carretera. Asimismo, va dirigido a la comunidad científica e investigadora peruana del ACV, con el objetivo de contribuir y aportar mayor información a la creciente literatura del ACV en carreteras peruanas.

Unidad funcional

Según la definición de la ISO 14040, la unidad funcional (UF) es el rendimiento cuantificado del sistema de un producto para ser usado como unidad de referencia (ISO, 2006a). En general, resulta difícil establecer una UF común en los ACV aplicados en la construcción, sin embargo, la mayoría de investigaciones establece el kilómetro de carretera como UF más común (Jiang y Wu, 2019). También es importante señalar que la UF se debe elegir en base al enfoque que tendrá la investigación. En este caso, el enfoque que se tuvo para este estudio es establecer los impactos ambientales de la carretera en un determinado tiempo, teniendo como principal objetivo determinar sus emisiones de GEI (ISO, 2006a).

La UF permite cuantificar y comparar una cantidad estándar entre los diferentes productos que cumplan la misma función (Yu, 2013). En la carretera estudiada, la UF definida será un kilómetro de carretera pavimentada en un año de uso, que es el periodo en el que se le brinda mantenimiento. Se decidió usar esta unidad tomando como referencia la mayoría de investigaciones de la literatura revisada, el enfoque seleccionado y el periodo de análisis.

El pavimento de la carretera estudiada es un pavimento flexible diseñado con la metodología AASHTO 93 como se mencionó en el inciso 3.1.2., teniendo de estructura una capa de carpeta asfáltica de 9 cm, una base granular y una sub base, ambas de 15 cm. La capacidad de servicio es óptima aún debido a la construcción reciente de la vía por lo que no necesita de un mantenimiento intensivo o rehabilitación, cabe resaltar que el mantenimiento periódico recién será realizado al año 10 del funcionamiento de la carretera, mientras tanto se realizan mantenimientos rutinarios anuales.

Límites del sistema

En el límite del sistema se determina todos los procesos unitarios que se incluirán en el ACV, así como su nivel de detalle (ISO, 2006b). Es importante resaltar los criterios utilizados para establecer qué etapas serán consideradas y cuáles serán obviadas en el ACV; asimismo, se debe considerar la geografía debido a que tienen una incidencia directa en los procesos unitarios como obtención de materiales o consumo de energía (Inyim et al., 2016). El periodo de análisis también debe ser tomado en consideración debido a que, a diferencia de otros productos, los pavimentos varían con el pasar del tiempo. Un límite de sistema inadecuado puede generar un error de hasta 50% en los resultados de impactos ambientales (Inyim et al., 2016).

Respecto a las carreteras, su ciclo de vida consta de seis etapas: extracción y producción de materiales, transporte de materiales, construcción, uso, mantenimiento y rehabilitación, y el fin de vida útil. La mayoría de autores de ACV en carreteras decide unir las etapas de transporte de materiales y construcción. Asimismo, se puede excluir la etapa de fin de vida útil ya que las carreteras reciben mantenimiento constante luego de ser construidas (Jiang y Wu, 2019).

Sistema 1

Para el primer sistema del estudio se delimitó a las etapas que tienen mayor incidencia ambiental y las que son más usuales en las investigaciones de ACV de carreteras revisadas. Además, se debe tener en consideración las limitaciones presupuestales, temporales y la confiabilidad de los datos obtenidos de cada etapa. Se consideró la producción de los materiales de construcción; la propia construcción de la carretera que abarca los pavimentos, obras de artes, señalización y alumbrado; el uso de la vía, el mantenimiento rutinario, y el consumo de energía y emisiones de GEI que se generan a lo largo de todo su ciclo de vida. Todos los procesos se detallan en la Figura 5.

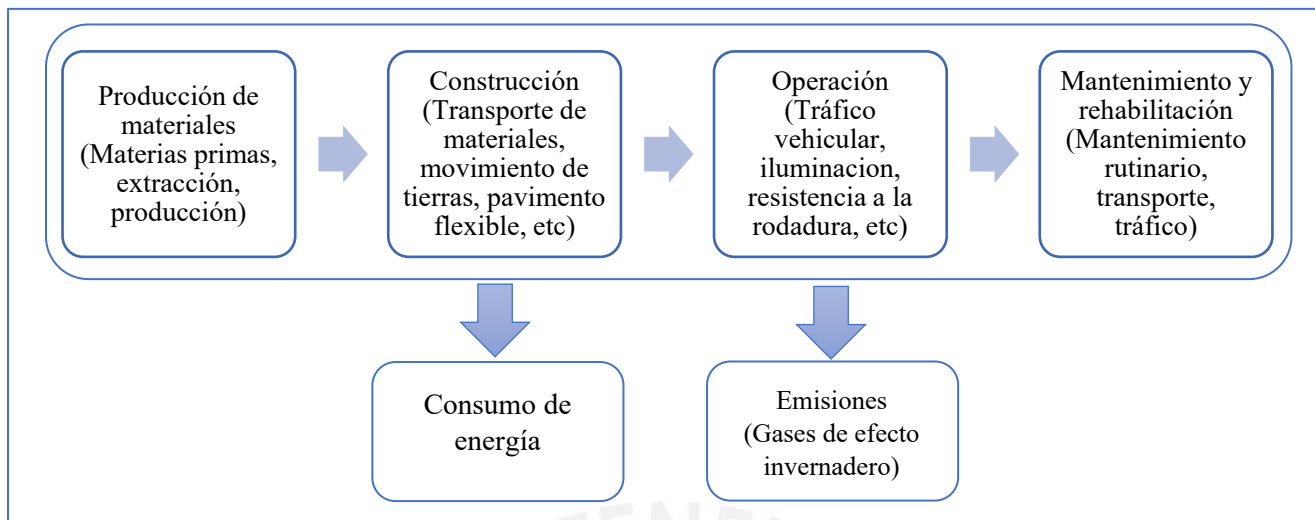


Figura 5: Límites establecidos del sistema 1 para la carretera Tacna-Collpa

Fuente: Propia

Sistema 2

Para el segundo sistema del estudio se delimitó, a diferencia del primero, las mismas etapas con la excepción de la etapa de mantenimiento debido al objetivo del estudio de comparar la influencia que tiene el mantenimiento de la carretera en los impactos ambientales. Algunas investigaciones determinaron que los impactos de la fase de uso pueden aumentar, como el aumento de emisiones de partículas, si el estado del pavimento es deficiente ya que el consumo de combustible se ve afectado por la rugosidad del pavimento (Inyim et al.,2016). Se espera poder analizar este caso de una manera más precisa con la carretera estudiada en cuestión. Todos los procesos tomados en consideración se detallan en la Figura 6.

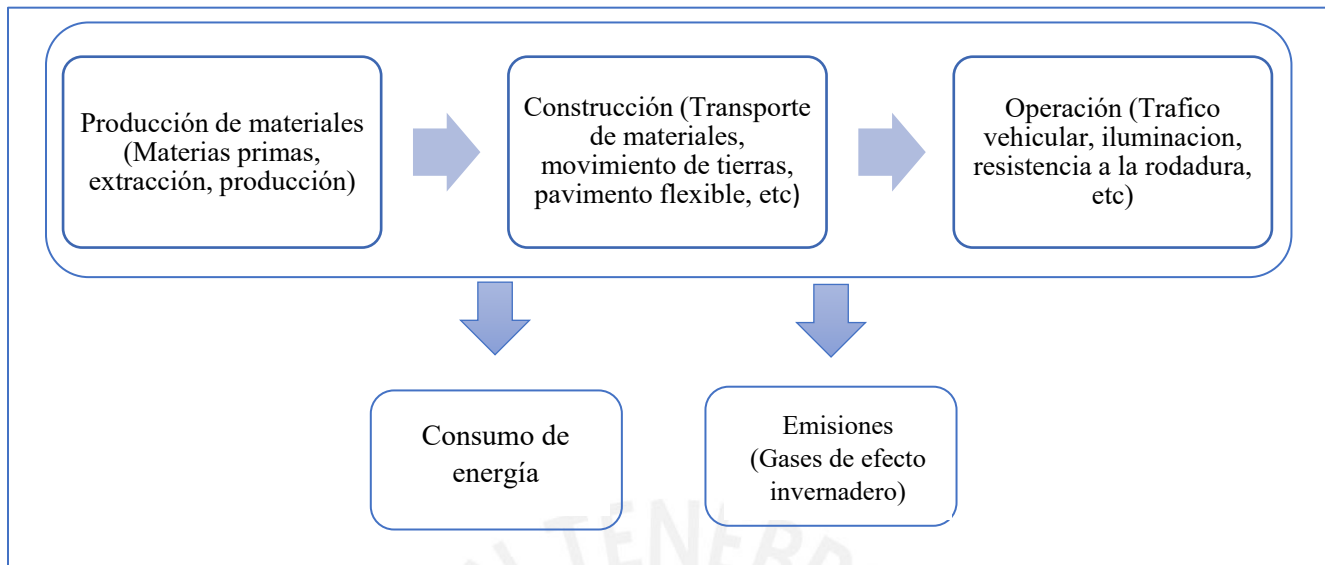


Figura 6: Límites establecidos del sistema 2 para la carretera Tacna-Collpa

Fuente: Propia

3.3.2. Inventario de Ciclo de Vida

La segunda fase en la metodología ACV es la creación y análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV), mediante la generación de entradas y salidas en un sistema definido previamente. Este ICV se crea en base a la recopilación de datos e información del proyecto estudiado y el método ACV adoptado en el estudio debido a que cada método dará resultados distintos por la naturaleza que posee cada uno (Li et al., 2019). En general, las entradas consisten en las materias primas usadas y el consumo de energía del producto, mientras que las salidas son las emisiones producidas a la atmósfera, el suelo y el agua (ISO, 2006a). Es en esta etapa donde se hace notoria la naturaleza iterativa del ACV debido a que, conforme se adquiere mayor información del proyecto en cuestión, se establecen nuevos límites o restricciones para que se logre cumplir los objetivos propuestos del estudio y, en algunos casos, reevaluar los objetivos (ISO, 2006a).

Esta etapa se subdivide en dos fases: recopilación de datos y cálculo de datos. Asimismo, en caso que se trabaje en un sistema con varios productos, se agrega la fase de asignación de flujos (ISO, 2006b). Los datos obtenidos deben ser para cada proceso unitario que se encuentra dentro de los límites del sistema inicial establecido. Usualmente para el ACV en carreteras se utiliza la información técnica de la vía e investigaciones de campo como fuente primaria de datos para los recursos utilizados, sin embargo, para el caso de emisiones resulta muy difícil obtener los datos en una fuente primaria por lo que se recurren a bases de datos regionales (Jiang y Wu, 2019). Para el cálculo de datos se deben especificar las unidades a utilizar, la incertidumbre de los datos, así como su relación con el proceso unitario y el flujo de la unidad funcional establecida (ISO, 2006a). Es importante refinar los límites del sistema conforme se adquieran datos para lograr cumplir los objetivos propuestos (ISO, 2006b).

Como se indicó anteriormente, las fuentes de datos primaria fueron el informe de estudio definitivo de la carretera y el informe de mantenimiento rutinario de todo el corredor vial del año 2021. Sin embargo, siempre existe la posibilidad de que la información requerida para los límites establecido esté incompleta, por lo que se acude a las fuentes secundarias y terciarias como lo fueron las fuentes de información del Gobierno peruano, el Gobierno regional de Tacna y la base de datos ecoinvent v3. Debido a que puede resultar complejo construir el ICV, se trabaja con la ayuda de un software para cuantificar de la mejor manera todas las entradas y salidas del estudio. El software utilizado en este caso es SimaPro, que ya tiene incluido la base de datos ecoinvent v3, la cual posee más de 15 000 datos de ICV de diferentes sectores como agricultura, transporte o materiales de construcción (SimaPro, 2021a). Se debe aclarar que los resultados pueden diferir de la realidad debido a que la base

de datos no posee, para la mayoría de procesos, información de Perú, por lo que se utilizó y adaptó bases de datos enfocadas en diferentes países desarrollados.

3.3.2.1. Construcción

Para crear el ICV de la fase de construcción, como fuente primaria de datos, se utilizó el expediente técnico del proyecto, este fue revisado anteriormente por una empresa consultora (HOB Consultores S.A.) que verificó y subsanó posibles incoherencias en los metrados, planos y costos por lo que los valores registrados poseen una confiabilidad muy alta. Para esta etapa, las partidas que tuvieron mayor relevancia fueron tres: movimiento de tierras, colocación de pavimento y obras de arte y drenaje.

De acuerdo con el expediente técnico, se construyó exactamente 52.235 km de carretera asfaltada. Es importante resaltar que el proyecto estuvo sometido a varios retrasos y paralizaciones, de acuerdo a especialistas involucrados en el proyecto, por problemas administrativos que hubo entre la empresa contratista y Provias Nacional, por lo que el avance del proyecto fue irregular y no hubo un avance constante de tramos de la carretera, construyéndose a veces solo 350 metros. Estos inconvenientes forjan que los resultados que se obtengan para 1 km puedan no ser lo suficientemente precisos para todo el tramo estudiado, lo cual será discutido más adelante con mayor detalle en las conclusiones del estudio.

Como se indicó anteriormente, las fuentes de datos secundarias y terciarias fueron obtenidas de la base de datos de ecoinvent, información de artículos académicos de estudios de ACV de carreteras e información de internet que permita complementar todo el alcance del estudio. Para comenzar el modelamiento del ICV de la fase

constructiva en el software SimaPro, se optó por dividir en tres campos: materiales, maquinaria y movimiento de tierras. Se decidió utilizar las cantidades totales de los metros de las partidas para los 52.235 km de vía debido a que no se logró tener acceso al cuaderno de obra y/o información afin que permitiera tener conocimiento sobre las cantidades exactas utilizadas para 1 km de carretera del proyecto, lo cual hubiera permitido tener un modelamiento más fidedigno. Es importante especificar que también se construyó un peaje en el proyecto, sin embargo, este fue subcontratado por una empresa distinta por lo que no se tiene datos e información del trabajo realizado y, subsecuentemente, no se tuvo en consideración para la creación del ICV.

El ICV para los materiales usados en la construcción de la carretera se muestra en la Tabla 2. El campo de materiales del ICV abarca los insumos propiamente dichos para la construcción de lo que conforman las estructuras del pavimento, las veredas, terraplenes, obras de arte y drenaje, y cualquier otra estructura presente en el proyecto. Como componente principal en el pavimento se tiene el asfalto diluido MC-30, el cual se encuentra presente tanto en la carpeta asfáltica como en la imprimación asfáltica y se compone de cemento asfáltico y kerosene, siendo determinante resaltar que su uso ya está discontinuado debido a su alta huella de carbono que genera, sustituyéndose por componentes más amigables con el ambiente como emulsión para imprimación (TDM, 2019). Asimismo, el otro material usado en gran medida para los pavimentos es el cemento asfáltico, del cual se obtiene el asfalto MC-30 como se indicó en líneas pasadas, que se modeló su composición como 100% bitumen de acuerdo a especificaciones de diferentes empresas proveedoras de este insumo (Ivel et al., 2020). Por otro lado, las bases y sub-bases granulares cumplen la función capas

anticontaminantes que puedan afectar la estructura y desempeño del asfalto, componiéndose principalmente de agregados como lo son la arena y grava (MTC, 2013). Otro de los materiales que conformaron los pavimentos flexibles fue el filler mineral, el cual sirve para alterar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico, específicamente endurecerlo al usarse como superficie de rodadura (MTC, 2013).

Para el caso de las obras de arte y drenaje, los principales insumos utilizados fueron concreto de diferentes resistencias para el revestimiento de cunetas, drenajes, sardineles, gaviones y veredas. Este fue constituido por una mezcla de cemento portland tipo I, agua, arena y grava; usándose la tabla de dosificaciones de UNACEM para determinar las cantidades necesarias de grava y arena (UNACEM, 2013). Para el caso del agua, la cantidad necesaria para todo el proyecto ya estaba especificada para todas las partidas que abarcan este insumo, incluyendo los pavimentos. La colocación de pintura fue otra de las principales partidas en este rubro a considerarse, teniendo pintura para tráfico y solvente xilol como los principales componentes. En el caso del acero de refuerzo, este fue utilizado para las barandas de seguridad y los concretos de diferentes resistencias acorde a las obras de arte que se realizaran, teniendo sus cantidades necesarias de forma explícita en cada partida de la sección de metrados.

Finalmente, el combustible utilizado mayormente fue diésel B2 para las máquinas utilizadas en los trabajos de construcción y, en menor porcentaje, la gasolina de 84 octanos para los vehículos usados en el transporte de personal y otros recursos de menor demanda, siendo estos modelados en referencia a la base de datos ecoinvent 3, adaptando el consumo de estos combustibles con la producción del mercado peruano.

Tabla 2.

ICV de materiales para la construcción de 52.235 km de carretera

Descripción	Cantidad	unidad	Uso
Asfalto Diluido MC-30	1 159	ton	Pavimento flexible
Cemento Asfáltico	7 094	ton	Pavimento flexible
Cemento Portland Tipo I	4 419	ton	Obras de arte y drenaje
Filler Mineral	1 013	ton	Pavimento flexible
Agua	82 540	ton	Pavimento flexible, obras de arte y drenaje
Arena	8 481	ton	Obras de arte y drenaje
Grava	10 889	ton	Obras de arte y drenaje
Agregados para base granular	59 772	ton	Pavimento flexible
Agregados para sub-base granular	65 324	ton	Pavimento flexible
Acero de refuerzo	95	ton	Obras de arte y drenaje
Pintura para tráfico	13 551	kg	Obras de arte y drenaje
Solvente Xilol	627	kg	Obras de arte y drenaje
Gasolina 84 octanos	79	ton	Maquinaria
Petróleo diésel B2	9 991	ton	Maquinaria

En lo que respecta a la maquinaria utilizada en el proceso constructivo, los insumos requeridos por estos equipos y sus componentes fueron obtenidos de la base de datos ecoinvent 3 debido a que ya considera su fabricación y mantenimiento de estos, diferenciándose la potencia de cada uno. No obstante, se modificó el consumo de combustible que la base datos tenía incluido debido a que se contaba con las cantidades reales de combustible utilizados y que fueron modelados en el campo de materiales. Se puede observar el campo de maquinaria utilizada en la Tabla 3. Es necesario aclarar que las horas-máquina ya consideran la partida de movimiento de tierras con el uso de vehículos como el camión volquete de 15 m³ y las excavadoras sobre orugas de distintas potencias. Al realizarse el modelado, se optó por no incluir el consumo de diésel ya que este apartado fue considerado en el ICV de materiales como se indicó en

líneas anteriores. Se agruparon los equipos acordes a su potencia como está trabajado en la base de datos de ecoinvent v3.

Tabla 3.

ICV de maquinaria para la construcción de 52.235 km de carretera

Descripción	Cantidad	unidad
Camión cisterna 4x2 2000 gal.	17 386	hm
Camión imprimador 6x2 178-210HP 2000 gal.	956	hm
Camión volquete 6x4 330HP 15m3	172 877	hm
Cargador sobre llantas 125-155 HP 3.0 YD3	14 417	hm
Cargador sobre llantas 200-250 HP 4.0 YD3	24 329	hm
Motoniveladora 145-150 HP	10 233	hm
Pavimentadora s/orugas 105 HP	1 465	hm
Excavadora s/orugas 115-165 HP	2 609	hm
Excavadora s/orugas 170-250 HP	8 815	hm
Tractor sobre oruga 190-240 HP	54 196	hm

La base de datos de ecoinvent 3 fue la principal herramienta utilizada en SimaPro, pues sirvió como base la creación de los distintos modelos para el desarrollo del ICV. La principal ventaja es que las investigaciones de ACV desarrolladas hasta la actualidad han permitido enriquecer aún más esta base de datos, permitiendo encontrar los insumos necesarios para el modelamiento de forma más directa y, en caso se tenga la información para adaptarlo a la realidad de cierta localidad, poder tener un resultado más cercano a la realidad. Los conjuntos de datos utilizados para el ICV de la construcción de la carretera se proyectan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Conjunto de datos principales de ecoinvent v3 utilizados para el modelamiento del ICV

Dataset	Uso
Bitumen adhesive compound, hot	Asfalto MC-30, cemento asfáltico
Gravel, round	Material para base y sub-base granular
Lyme, hidrated	Filler mineral
Sand	Arena
Water, completely softned	Agua
Cement, Portland	Cemento Portland tipo I
Steel	Acero de refuerzo
Petrol, unleaded	Gasolina 84 Octanos
Diesel, production	Petróleo diésel B2
Machinery, operation	Maquinaria

Nota. Adaptado de ecoinvent v3, por SimaPro, 2022.

3.3.2.2. **Mantenimiento**

El mantenimiento rutinario se realiza de forma anual mientras que el mantenimiento periódico se realizará cada 10 años. No obstante, solo se pudo obtener la información del mantenimiento rutinario por lo que solo se consideró este mismo para el estudio de ACV. Esto se debe a que aún no se ha creado el plan de mantenimiento periódico debido a la reciente construcción de la carretera según personal relacionado al proyecto. Los datos para el modelado fueron obtenidos del informe de mantenimiento rutinario y periódico realizado en 2021 para todo el corredor vial desde Ilo hasta Collpa realizado por la empresa *China Civil Engineering Construction Corporation Sucursal Del Perú* (SEACE, 2021). Este proceso fue dividido en tramos que conforman todo el corredor vial para identificar las deficiencias y tratamientos de cada uno, siendo uno de los tramos el del proyecto estudiado presente (Prog. 43+600 - Prog. 95+835) por lo que el metrado de material necesario reflejado resulta altamente confiable ya que fue

calculado en base a las necesidades de reparación específicas que requería el trayecto. En el informe se determinó que el tramo se encontraba aún en buen estado debido a que la construcción fue de años recientes por lo que los trabajos fueron netamente superficiales como parchado superficial y profundo de calzadas y bermas, y sellado de fisuras y grietas; realizándose estos trabajos enteramente con cemento asfáltico. De acuerdo con el informe de mantenimiento, la cantidad de cemento asfáltico utilizado para los trabajos de mantenimiento fue de 12 693 kg.

Respecto a la maquinaria y equipo utilizado, esta información fue simplificada en el informe para la todas las vías que conforman del corredor vial, segmentándose según el tipo de mantenimiento requerido. Debido a esto, se consideró que lo más conveniente para el modelado en SimaPro fue adaptar proporcionalmente la cantidad de horas-máquina (hm) con la longitud del tramo estudiado. Por lo tanto, se calculó las hm necesarias, pertenecientes a los 52.235 km, en base a los valores de los 346.71 km que pertenecen a todo el corredor vial como se observa en la Tabla 5

Tabla 5.

Maquinaria considerada en el ICV del mantenimiento de carretera

Descripción	Cantidad	Unidad
Cargador sobre llantas 125-155 HP 3 yd3	181	hm
Retroexcavadora sobre llantas 58 HP	226	hm
Camión volquete 15 M3	188	hm
Minicargador 67-74 HP	90	hm

Nota. Adaptado de CONTRATACIÓN DE SERVICIO DE GESTIÓN Y CONSERVACIÓN POR NIVELES DE SERVICIO DEL CORREDOR VIAL: ILO – TACNA – TRIPARTITO y OVALO TRIPARTITO – COLLPA, de SEACE, 2021.

3.3.2.3. Uso

El ICV para la fase de uso consistió netamente en la cantidad de vehículos que circulen en ambos sentidos de la carretera para 1 año de operación. Para obtener esta información, se empleó el estudio de tráfico utilizado para el expediente técnico de la construcción de la carretera debido a que fue la única fuente bibliográfica detectada que abarcaba el tramo estudiado en lo que respecta a cantidad de vehículos que la transitan. En virtud de que el estudio data del año 2014, se optó por utilizar los datos de la proyección para años posteriores, teniendo convenientemente la proyección para el año 2022 por lo que los datos de la referencia poseen una alta confiabilidad para su integración a la investigación.

En el estudio de tráfico descrito se encontró que en la carretera transitan 6 tipos diferentes de vehículos, teniendo mayor presencia los vehículos ligeros (38% aprox.) y camiones acoplados (23% aprox.) según la IMD del estudio. Debido a que el modelamiento es para un año de operación, se utilizó las cantidades que se observan en la tabla para el año 2022, como se explicó previamente, multiplicándose por 365 días (1 año) para lograr obtener la cantidad de vehículos en un año.

Tabla 6.

Inventario de tráfico vehicular de la carretera en un año de operación

Tipo de vehículo	Cantidad	Unidad
Vehículo ligero	77 015	veh
Camioneta rural	39 785	veh
Microbús	3 650	veh
Ómnibus	12 410	veh
Camión unitario	25 185	veh
Camión acoplado	46 720	veh
Total	204 765	veh

Para el modelamiento de cada tipo de vehículo en el programa SimaPro, se seleccionaron vehículos que tuvieran características similares a los que transitan normalmente en Perú. Por ejemplo, se consideró solamente transportes Euro 3 debido a la aun predominancia de esta categoría en las diferentes clases de vehículos que transitan las carreteras de Perú. Asimismo, se ha tomado en cuenta el diésel B2 como principal combustible utilizado para los vehículos modelados en el programa. Para el caso de los transportes de carga pesada, se utilizó el “MANUAL DE CARRETERAS: DISEÑO GEOMÉTRICO DG – 2018” para seleccionar los datos que más se asemejen a la realidad peruana como se muestra en la Tabla 7 (MTC, 2018).

Tabla 7.

Conjunto de datos de ecoinvent v3 utilizados para el modelamiento del ICV de uso vehicular

Dataset	Uso
Transport, freight 16-32 t, lorry Euro 3	Camión acoplado
Transport, passenger car, large size, diesel, Euro 3	Camioneta rural
Transport, freight 7.5-16 t, lorry Euro 3	Camión unitario
Transport, passenger coach	Ómnibus
Transport, regular bus	Microbús
Transport, passenger car, medium size, diesel, Euro 3	Vehículo ligero

Nota. Adaptado de ecoinvent v3, por SimaPro, 2022.

3.3.2.4. Modelamiento de emisiones de partículas

Debido a que durante las fases de construcción y uso existe una formación considerable de partículas generadas por los vehículos y maquinaria que se encuentran en la carretera, se modelaron siguiendo los lineamientos de la Environmental Protection Agency (EPA), donde plantean modelos para estimar la cantidad de material particulado que emiten los vehículos en carreteras pavimentadas y no pavimentadas. Las emisiones que se consideraron en este estudio fueron: re-suspensión de material suelto, desgaste de frenos y desgaste de neumáticos.

Para las emisiones por re-suspensión de material suelto, la EPA plantea un método para estimar esta cantidad de material particulado en el *Informe AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*, donde en el capítulo 13.2.1 considera la circulación de vehículos

en una carretera pavimentada seca (EPA, 2011). Para la fase de uso de la carretera, se usará la siguiente ecuación:

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

Donde:

- E= Factor de emisión de partícula (g/VKT)
- k= Factor multiplicador según tamaño de partículas (g/VKT)
- sL= Carga de limos en la superficie de la carretera (g/m²)
- W= Peso promedio de vehículos que transitan en la carretera (ton)

Para determinar el factor k, se utilizó la Tabla 8 del capítulo 13.2.1 del Informe AP-42 para diferentes tamaños de partículas (PM), donde se seleccionaron las PM-2.5 y PM-10 ya que son las que generan los vehículos en carreteras (EPA, 2011). Se trabajó en unidades del SI por lo que los valores de k están en gramos/Vehículo-Kilómetro Recorrido (g/VKT).

Tabla 8.

Valores de factor k según rango de tamaño

Rango de tamaño	Factor k g/VKT
PM-2.5	0.15
PM-10	0.62

Nota. Adaptado de AP-42: Compilation of Air Emissions Factors: Chapter 13.2.1, por EPA, 2011.

Respecto al peso de los vehículos que transitan por la carretera (W), este fue obtenido en base a los valores del Reglamento Nacional de Vehículos que indican para cada tipo de vehículo como se muestra en la tabla 10 (MTC, 2003). Se determinó un ponderado

de acuerdo a la cantidad y tipo de vehículos que transitan en la carretera en un año, obteniéndose 15.52 toneladas americanas que equivalen a 17.1 toneladas métricas.

Tabla 9.

Peso ponderado de vehículos que transitan en la vía en un año

Tipo de vehículo	Cantidad	Peso (ton)
Vehículo ligero	77 015	1.4
Camioneta rural	39 785	3.0
Microbús	3 650	7.5
Ómnibus	12 410	23
Camión unitario	25 185	25
Camión acoplado	46 720	43
Total	204 765	17.10

Nota. Adaptado de Reglamento Nacional de Vehículos, por MTC, 2003.

Finalmente, para la cantidad de limo en la superficie de la vía, se utilizó la tabla del capítulo 13.2.1. del AP-42 para cantidades típicas según la intensidad media diaria de vehículos (IMD), donde se obtuvo 0.2 g/m² al tener un IMD de 561 vehículos (EPA, 2011). Teniéndose todas las variables presentes en la ecuación, se realizó el cálculo correspondiente de emisiones para cada tamaño de partícula en un año de tráfico vehicular como se representa en la Tabla 10.

Tabla 10.

Emisión por re-suspensión de material suelto en un año de flujo vehicular

Tamaño de partícula	Emisión (ton)
PM-2.5	6.71
PM-10	27.73

Para determinar este tipo de emisiones en la fase constructiva, en el capítulo 13.2.2, la EPA considera un modelo para determinar estas emisiones en una carretera sin pavimentar, el cual era el estado de la vía antes de su construcción (EPA, 2006). Para esta fase se usará la ecuación que se plantea para sitios industriales:

$$E = k(s/12)^a * (W/3)^b$$

Donde:

- E= Factor de emisión de partícula
- k, a y b= Factor multiplicador según tamaño de partículas
- s= Carga de limos en la superficie de la carretera (%)
- W= Peso promedio de vehículos que transitan en la carretera (ton)

Al igual que la Tabla 9., los factores k, a y b están determinados para los diferentes tamaños de partículas y dependen del uso que se le dé a la carretera. Como se indicó anteriormente, se considerarán los valores para carreteras industriales como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Valores de factor k, a y b según rango de tamaño

Constante	Carreteras industriales	
	PM-2.5	PM-10
k (g/VKT)	42.285	422.85
a	0.9	0.9
b	0.45	0.45

Nota. Adaptado de AP-42: Compilation of Air Emissions Factors: Chapter 13.2.2, por EPA, 2006

En este caso se consideró solamente el peso de vehículos de carga pesada como volquetes, camión cisterna y camión imprimador; teniéndose un peso ponderado de 27.1 toneladas métricas en base a las horas maquinas trabajadas en la construcción de la pista. Asimismo, el porcentaje de limos en la superficie fue de 8.5% y se obtuvo con la tabla del capítulo 13.2.2. del AP-42 para cantidades respecto al tipo de industria que se estaba trabajando, siendo construcción el caso de estudio (EPA, 2006). Con los valores de cada variable se realizó el cálculo respectivo para cada emisión de partícula, obteniéndose las cantidades de emisión parcial que se muestran en la Tabla 12.

Para obtener las emisiones totales, el modelado se basó en el trabajo de Verán-Leigh et al., donde se consideró que los vehículos seleccionados transportaron los materiales con su capacidad máxima, además el expediente técnico especificaba la distancia media de transporte hacia las canteras, depósitos de material excedente y fuentes de agua (Verán-Leigh et al., 2019). Con esta información, se pudo determinar el número de viajes que realizaría un solo vehículo de cada tipo y las emisiones totales generadas por re-suspensión de material suelto.

Tabla 12.

Ratios de emisión por re-suspensión de material particulado durante construcción de la carretera

Tamaño de partícula	Emisión (g/VKT)
PM-2.5	83.332
PM-10	833.315

El desgaste de frenos es el segundo tipo de generador de partículas que se consideró. Para este caso, se utilizó la guía *Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles*

in MOVES2014 de la EPA, donde se indican valores típicos de emisión de partículas PM-2.5 y PM-10 para diferentes tipos de vehículos mediante la recopilación de literatura de años anteriores a la fecha de su publicación y el software *Motor Vehicle Emission Simulator 2014* como se muestra en la Tabla 13 (EPA, 2014).

Para el caso del desgaste de frenos la información de la guía fue limitada para la cantidad de emisión de PM-2.5 y PM-10 por tipo de vehículo ya que la mayoría de información se dividía solamente en vehículo ligero y vehículo pesado. Se tuvo que asumir y agrupar algunas clases de vehículos entre la información disponible en la guía por lo que existe cierto grado de incertidumbre.

Tabla 13.

Ratios de emisión por desgaste de frenos por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Ratio de emisión (mg/VKT)	
	PM-2.5	PM-10
Vehículo ligero	2.300	18.517
Camioneta rural	3.853	30.944
Microbús		
Ómnibus		
Camión unitario	8.900	12.100
Camión Acoplado		

Nota. Adaptado de *Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014*, por EPA, 2014

Con los valores de cada ratio de emisión, se calculó la emisión total generada por cada tamaño de partícula multiplicando la cantidad total de vehículos por la longitud total

de la carretera y por el ratio de emisión correspondiente al tipo de vehículo como se representa en la Tabla 14.

Tabla 14.

Emisión por desgaste de frenos por tipo de vehículo en un año

Tipo de vehículo	Emisión generada (kg)	
	PM-2.5	PM-10
Vehículo ligero	9.253	74.492
Camioneta rural	8.007	64.307
Microbús	0.735	5.900
Ómnibus	5.769	7.844
Camión unitario	11.708	15.918
Camión acoplado	21.720	29.529
Total (kg)	57.192	197.989

Nota. Adaptado de Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014, por EPA, 2014

Finalmente, el desgaste de neumáticos fue el último tipo de emisión de partículas que se consideró para el proyecto. Del mismo modo que el desgaste de frenos, se utilizó como referente la guía *Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014* de la EPA, donde se indicaba una cantidad estimada de PM-2.5 y PM-10 para todos los tipos de vehículos que transitaban por la carretera, por lo que no se tuvo que asumir valores para ninguno de los casos como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15.

Ratios de emisión por desgaste de neumáticos por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Ratio de emisión (mg/VKT)	
	PM-2.5	PM-10
Vehículo ligero	0.932	6.090
Camioneta rural	0.932	6.214
Microbús	1.491	9.818
Ómnibus	2.734	18.206
Camión unitario	0.932	6.338
Camión acoplado	1.926	12.800

Nota. Adaptado de Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014, por EPA, 2014

Las emisiones generadas por desgaste de neumáticos en un año se muestran en la Tabla 16, estas se calcularon del mismo modo que para las emisiones por desgaste de frenos, multiplicando los ratios respectivos por la longitud de la carretera y el número de vehículos.

Tabla 16.

Emisión por desgaste de neumáticos por tipo de vehículo en un año

Tipo de vehículo	Emisión generada (kg)	
	PM-2.5	PM-10
Vehículo ligero	3.749	24.499
Camioneta rural	1.937	12.914
Microbús	0.284	1.872
Ómnibus	1.772	11.802
Camión unitario	1.226	8.338
Camión acoplado	4.700	31.237
Total (kg)	13.669	90.662

Nota. Adaptado de Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014, por EPA, 2014

3.3.3. Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida

Con el ICV ya establecido se pasa a la etapa del ACV de analizar los impactos del Ciclo de Vida (EICV) en base a los resultados obtenidos del ICV. En esta fase se asocian los datos del ICV con categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, utilizando distintos métodos que permitan determinar y estudiar estos parámetros (ISO, 2006b). La elección de categorías de impacto y desempeño ambiental deben estar debidamente justificadas y en concordancia con la calidad de datos recogidos (Jiang y Wu, 2019). Es importante resaltar que influye considerablemente el criterio del investigador por lo que resulta fundamental la transparencia de información en esta etapa (ISO, 2006a).

Una limitante que se genera en esta etapa es que solo se abarca los peligros ambientales especificados en los objetivos y alcances, lo que resulta en una evaluación parcial de todo

el sistema real del producto estudiado en cuestión (ISO, 2006a). Este problema se agudiza en las carreteras, pues varios estudios se limitan a elegir pocas categorías de impacto como solo emisiones de GEI y consumo de energía, sin tomar en consideración otras categorías que llegan a tener relación directa con las carreteras (Jiang y Wu, 2019). Esta fase consta de tres pasos importantes: selección de indicadores ambientales, clasificación de resultados y caracterización de resultados de cada indicador. Adicional a estos tres se puede incluir la agrupación, ponderación y magnitud de los resultados como se observa en la Figura 7 (Li et al., 2019).

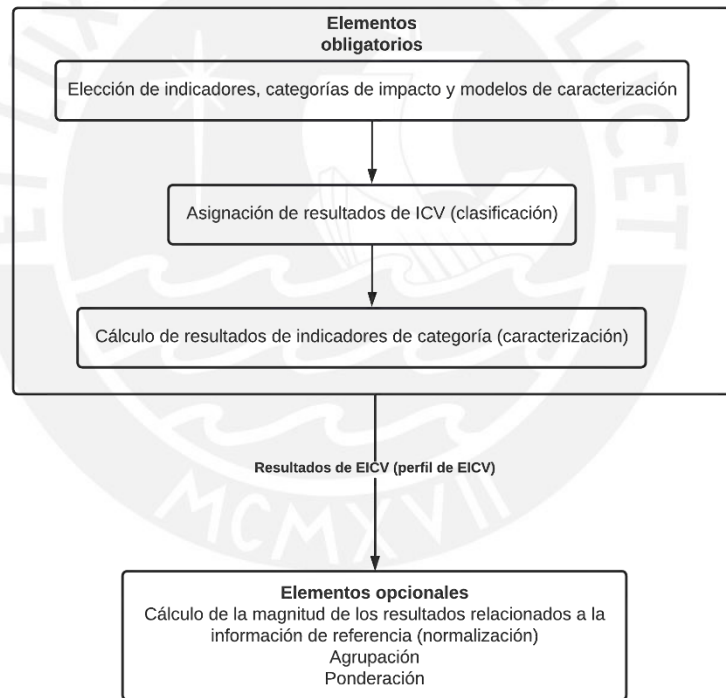


Figura 7: Elementos requeridos para el desarrollo de la EICV

Fuente: Adaptación de ISO, 2006a

Métodos

En cuanto a los métodos a utilizar, estos pueden ser clasificados en categorías unitarias o multi-categorías, agrupando un número de categorías específicas que pueden ser orientados a problemas o a daños, conocidos usualmente como midpoint y endpoint respectivamente (Li et al., 2019). En los métodos midpoint se agrupan los modelos cuantificados de los impactos ambientales relacionados a las etapas primarias de la cadena causa-efecto como cambio climático, toxicidad humana, uso del agua, etc (Jiang y Wu, 2019; Li et al. 2019). Por otro lado, en los métodos endpoint se asocian los daños ambientales, es decir los efectos mismos y daños ambientales reales, que constan de daños a la salud humana, al ecosistema y al agotamiento de recursos (Li et al., 2019). La mayoría de estudios de ACV en pavimentos y carreteras optan por utilizar los midpoint como GWP, la acidificación y eutrofización debido a que aplicar un método endpoint requiere de una mayor experiencia para el análisis y está sujeto a una mayor incertidumbre al poseer pocas categorías de impacto (Jiang y Wu, 2019). Distintas metodologías se han desarrollado para abarcar ambos enfoques, podemos mencionar a CML 2001, TRACI, EDIP 2003 e IPCC 2013 que estudian los midpoint, mientras que Eco-Indicator 99 y ReCiPe abarcan ambos enfoques.

De los diferentes métodos ya mencionados previamente, se eligieron para el presente estudio los métodos midpoints ReCiPe e IPCC 2013 100y. El primero fue seleccionado debido a su uso difusión generalizada en la mayoría de proyectos de ACV de carreteras, además de estar incluido en el software SimaPro, el cual será utilizado para la presente investigación. Asimismo, IPCC 2013 100y fue elegido por el contexto actual que vive la humanidad por la problemática del avance progresivo del calentamiento global en el

mundo. En los siguientes párrafos se profundizará las metodologías elegidas y su relación con el estudio.

a. ReCiPe

ReCiPe es un método que fue desarrollado en 2008 por la empresa PRé Sustainability en cooperación con el Instituto Nacional de Salud Pública y Ambiente de Países Bajos, y las universidades Radboud de Nimega y Leiden (PRé Sustainability, 2016). Este método consiste en agrupar todos los resultados del ICV en un grupo de indicadores que expresan la gravedad relativa en base a una categoría de impacto ambiental (ReCiPe, 2018). Está constituido por 21 indicadores divididos en dos niveles: 18 indicadores midpoint y 3 indicadores endpoint, donde cada nivel posee un enfoque distinto en base a tres perspectivas culturales: individualista, jerarquista e igualitaria (PRé Sustainability, 2016). Posee el grupo de categorías de impacto ambiental más grande, priorizando el alcance global cuando sea posible; a diferencia de otros métodos como Eco-Indicator 99, EPS o LIME. Actualmente la versión en uso es la ReCiPe 2016, una versión mejorada de la ReCiPe 2008. En la Figura 8 se puede observar la mayoría de resultados de ICV que abarca este método, así como las categorías de impacto que toma en cuenta.

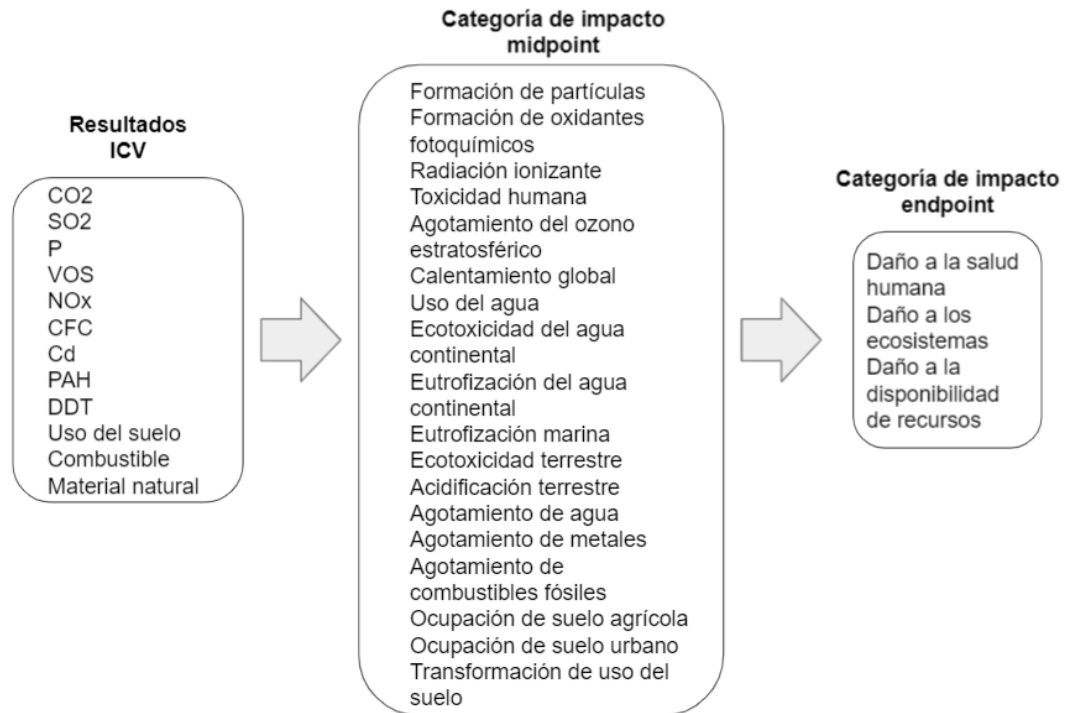


Figura 8: Categorías de Impacto Ambiental según ReCiPe

Fuente: Adaptación de RIVM, 2017

De las 18 categorías ambientales midpoint existentes de ReCiPe se seleccionaron seis por las características del límite geográfico del estudio y por las características únicas que posee la carretera a diferencia de otros productos que son estudiados en un ACV. Las categorías de impacto seleccionadas fueron:

Toxicidad humana (HT): El uso agentes químicos en diferentes componentes de la carretera como el pavimento, los aditivos, etc., suponen un serio peligro para los ecosistemas en el entorno de la carretera. Las emisiones de agentes químicos en la atmósfera, tierra y agua pueden incrementar la posibilidad de desaparición de especies y recursos (RIVM, 2017).

Formación de partículas (PMF): El material particulado fino menor a 2.5 μm (PM 2.5) es una sustancia muy nociva para la salud humana y el ambiente compuesta de material orgánico e inorgánico (RIVM, 2017). Debido a la fricción y deterioro que existe por el uso de la carretera por parte de camiones de carga y transporte, el material particulado se convierte en una categoría de impacto indispensable para el análisis, además se agrega el hecho de que la carretera pasa por zonas áridas, lo que incrementa la formación de estas partículas.

Agotamiento de combustibles fósiles (FRS): Durante la construcción y mantenimiento periódico de la carretera, se requiere de un uso arduo de maquinaria y equipo para su ejecución, lo que se traduce en un gran uso de combustible fósil que aún es predominante en Perú. Además, las probables congestiones durante estas etapas y la circulación de vehículos durante la etapa de uso, aumentará el consumo de combustible. Se utiliza principalmente en los endpoints pero también con los midpoints mediante el potencial de uso de combustible fósil o valor calorífico superior (RIVM, 2017).

Agotamiento de minerales (MD): Además de la maquinaria y el equipo, se requieren insumos para la realización de la carretera y sus obras adyacentes como puentes, obras de arte y drenaje, etc. Esto trae como consecuencia el aumento de mineral producido por kilogramo del recurso extraído que, combinado con la proyección futura para la extracción del recurso, genera un potencial de mineral excedente (SOP por sus siglas en inglés), siendo este el indicador midpoint (RIVM, 2017).

Acidificación terrestre (TA): Los trabajos de construcción y mantenimiento de la carretera pueden provocar emisiones de sulfatos, nitratos y fosfatos (NO_x , NH_3 y SO_2), generando su deposición en el suelo y generando un cambio en su nivel de acidificación. Este

desequilibrio ambiental puede afectar a especies vegetales que se encuentran en el suelo, provocando un daño severo o su desaparición (RIVM, 2017).

Transformación de uso del suelo (NLT): Dado que la carretera fue construida en una zona agrícola, se tuvo que realizar un movimiento de tierras antes de su construcción, lo que provocó el desplazamiento de especies y la pérdida de recursos naturales. Esta categoría se enfoca en comparar el uso actual del terreno con uno idealizado natural si no se hubiera dado la transformación (RIVM, 2017).

b. IPCC 2013

El segundo método que se utilizará en el presente estudio es el desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el año 2013 y publicado en 2014 en el Quinto Informe de Evaluación donde, a comparación de anteriores informes, se prioriza los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible (IPCC, 2013). El método IPCC GWP 100y consiste en relacionar en un lapso de tiempo determinado la liberación inmediata de 1 kg de una sustancia con 1 kg de un gas de referencia que usualmente es CO₂, expresándose en la unidad kg CO₂-eq (huella de carbono) (Coelho et al., 2019). La IPCC recomienda utilizar un periodo temporal de 100 años debido a que es el tiempo suficiente para evaluar los efectos acumulados de las emisiones de GEI (Coelho et al., 2019). Este método es utilizado con el objetivo de mitigar el cambio climático que, si bien también está dentro de las categorías midpoints del método ReCiPe, la IPCC la encuentra mejor sustentada y más actualizada, incluyendo una versión más reciente y mejorada para el año 2021 en el Sexto Informe (Larrea-Gallegos et al., 2017).

Para la presente investigación se eligió esta categoría impacto debido a que profundiza más en la problemática del calentamiento global, a diferencia de la misma categoría en el método ReCiPe, la cual toma como base este mismo indicador. Actividades humanas como la construcción y transporte contribuyen al daño ambiental que se ha incrementado en los últimos años, dando como resultado el avance progresivo del calentamiento global en el mundo. Esto evidencia la necesidad de cuantificar las posibles emisiones de CO₂ y otros GEI que se produzcan durante todo el ciclo de vida de la carretera. En la Tabla 17. se considera las categorías de impacto elegidas para este estudio.

Tabla 17.

Categorías de impacto seleccionadas para la EICV de la carretera Tacna-Collpa

Categoría de impacto	Metodología	Factor de caracterización
Toxicidad humana (HT)	ReCiPe	kg 1,4-DB eq
Formación de partículas (PMF)	ReCiPe	kg PM-2.5 eq
Agotamiento de combustibles fósiles (FRS)	ReCiPe	kg oil eq
Agotamiento de minerales (MD)	ReCiPe	kg Cu eq
Acidificación terrestre (TA)	ReCiPe	kg SO ₂ eq
Transformación de uso de suelo (NLT)	ReCiPe	Ha
Calentamiento Global (GWP)	IPCC 2013	ton CO ₂ eq

3.3.4. Interpretación de resultados

La interpretación de resultados es la cuarta y última fase de cualquier estudio de ACV. Se analizan y discuten los resultados obtenidos con el ICV y las categorías de impacto seleccionados para cada sistema en estudio (ISO, 2006b). Consta de tres componentes: identificación de problemas importantes; verificación de integridad, coherencia y sensibilidad; y la creación de conclusiones y recomendaciones (Jiang y Wu, 2019). Las conclusiones y recomendaciones nos permitirán determinar y evaluar diferentes opciones para mitigar los impactos ambientales producto del uso de determinados materiales o procedimientos constructivos para que, en futuros mantenimientos de la carretera, puedan ser aplicados.

Como se indicó en capítulos anteriores, el ACV posee una naturaleza iterativa, por lo que la interpretación de resultados, en la mayoría de ocasiones, conlleva a cambiar y perfeccionar el ICV, así como los objetivos y alcances del estudio. Es importante recalcar que se espera que estas recomendaciones sean consideradas y aplicadas en futuros proyectos viales de la empresa concesionaria y el Estado Peruano como se indicó anteriormente en los objetivos y alcances.

3.3.5. Análisis de sensibilidad

Es necesario realizar un análisis de sensibilidad en la etapa de interpretación de resultados para lograr verificar la veracidad e influencia de los datos seleccionados en los resultados de ACV. Según la normativa ISO 14044, el análisis de sensibilidad es un requisito obligatorio para los estudios de ACV (ISO, 2006b). No obstante, en la literatura de ACV de carreteras resulta ser una etapa poco frecuentada u omitida por la mayoría de investigaciones (Jiang y Wu, 2019).

Para lograr este análisis se crearon escenarios adicionales a los ya estudiados (carretera con y sin mantenimiento), en base a posibles situaciones que no se hayan considerado en los escenarios base y que puedan presentarse en estos mismos. Esto permitirá identificar cuan influyentes son la variación de ciertos parámetros en los resultados e interpretación del ACV.

Tabla 18.

Descripción de cada escenario para el análisis de sensibilidad de la carretera

Escenarios	Descripción
A1	Carretera con mantenimiento
A2	Cambio de tráfico vehicular de A1 de normativa Euro III a Euro VI
A3	Sustitución de vehículos ligeros en A1 con carros eléctricos
A4	Incremento de tráfico vehicular de A1 con las proyecciones del estudio de tráfico para el año 2037
B1*	Carretera sin mantenimiento
B2*	Cambio de tráfico vehicular de B1 de normativa Euro III a Euro VI
B3	Incremento de tráfico vehicular de B1 con las proyecciones del estudio de tráfico para el año 2037

*:El flujo vehicular es el mismo que el escenario A1

3.4. Uso de software para el ACV

Para lograr los objetivos planteados en el estudio, se requiere de un software que permita procesar todos los datos del ICV. Los softwares permiten agilizar la obtención de resultados a comparación de cálculos manuales, lo que se convierte en un ahorrador de recursos y tiempo,

sin embargo, requiere de una capacitación para lograr entender la interfaz y las funciones que los componen. Actualmente se han desarrollado varios softwares para los ACV, entre los principales podemos destacar: SimaPro, Athena y GaBi. Sin entrar en mayor detalle, se descartó el uso de Athena y GaBi debido a que son softwares mayormente orientados a ACV de edificios y no de infraestructura vial como es el caso de este estudio.

SimaPro v8.05 es el software que se utilizará para la presente investigación. La primera versión de este programa fue desarrollada aproximadamente hace 30 años por la empresa holandesa PRé Sustainability, una de las principales empresas a nivel mundial especialistas en evaluaciones de impacto ambiental y social (SimaPro, 2021b). Además, ha desarrollado metodologías ampliamente utilizadas en el campo de la gestión ambiental como ReCiPe y Eco-Indicator 99 (SimaPro, 2021b).

El software permite medir analíticamente la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de confiabilidad. SimaPro cuenta con 15 bases de datos, entre las que destacan: ecoinvent v3, Industry data library, Agri-footprint y US Life Cycle Inventory Database (SimaPro Mx, 2021). Además, cuenta con diferentes metodologías de evaluación ambiental como Environmental Footprint (EF), IPCC 2013, ReCiPe 2016 Endpoint y ReCiPe 2016 Midpoint (SimaPro Mx, 2021).

4. RESULTADOS

Luego de recopilar la información necesaria de cada etapa del ciclo de vida de la infraestructura vial para después modelarla en el software SimaPro, se obtuvieron los resultados principales utilizando los métodos de análisis *IPCC 2013* y *ReCiPe 2016 midpoint Hierarchist* para las categorías de impacto seleccionadas como se especificó en el capítulo anterior.

4.1. Carretera con mantenimiento

4.1.1. Etapa de construcción

La primera etapa a ser analizada en el software fue la constructiva debido a la mayor cantidad de entradas que esta poseía. En esta se halló que la maquinaria fue la que mayor incidencia tuvo en todas las categorías de impacto. El uso de equipos y máquinas llegó a ser el causante de más del 50% de impactos ambientales en cuatro de las siete categorías, incluyendo GWP. Para el caso del pavimento flexible, se tuvo mayor impacto ambiental en FRS (42%), NLT (39%) y TA (28%). La última entrada en ser analizada fue obras de arte y drenaje, siendo esta la que menor impacto ambiental provocó de las tres ya mencionadas, teniendo mayor efecto ambiental en MD (32%), HT (17%) y NLT (14%). Los valores descritos previamente del software se ven reflejados en la Tabla 19.

Tabla 19.

Impactos ambientales de la construcción de 1 km de carretera para 1 año de operación

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Total	Maquinaria	Pavimento flexible	Obras de arte y drenaje	Emisión de partículas de maquinaria
Toxicidad humana	ton 1,4-DB eq	2.82	1.94	0.409	0.474	-
Formación de partículas	ton PM2.5eq	0.238	0.053	0.023	0.006	0.156
Agotamiento de combustibles fósiles	ton oil eq	41.6	23.0	17.6	0.972	-
Agotamiento de minerales	ton Cu eq	0.169	0.079	0.036	0.054	-
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	0.240	0.160	0.067	0.013	-
Transformación de uso de suelo	m ² a cropeq	2 046	967	795	284	-
Calentamiento Global	ton CO ₂ eq	68.4	49.6	10.6	8.15	-

Nota. Adaptado de SimaPro, 2022.

4.1.2. Etapa de uso

En el modelamiento realizado para la fase de uso, se dividió de acuerdo al tipo de vehículo que transitaba por la vía en ambos sentidos. Se tuvo como resultados una predominancia del ómnibus como principal agente de impactos ambientales en las siete categorías analizadas, siendo responsable de cerca del 48% de emisiones en GWP para todo el sistema de tráfico vehicular y más del 50% en NLT (53%) y TA (52%). En contraste, el camión unitario tuvo el menor impacto en las siete categorías. Asimismo, el microbús fue el segundo mayor emisor en las categorías de GWP (14%), FRS (14%), TA (16%) y NLT (12%). Finalmente, el vehículo liviano tuvo el segundo mayor impacto en las categorías de MD (26%) y HT (22%). Los resultados obtenidos y descritos se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20.

Impactos ambientales del tráfico vehicular para 1 año de operación en 1 km de carretera

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Total	Camión acoplado	Camión unitario	Camioneta rural	Microbús	Vehículo liviano	Ómnibus	Emisión de partículas
Toxicidad humana	ton 1,4-DB eq	4.16	0.343	0.287	0.772	0.369	0.900	1.49	-
Formación de partículas	ton PM2.5eq	0.259	0.012	0.008	0.010	0.019	0.015	0.064	0.130
Agotamiento de combustibles fósiles	ton oil eq	28.4	2.76	1.90	2.63	3.98	3.48	13.6	-
Agotamiento de minerales	ton Cu eq	0.218	0.016	0.013	0.048	0.016	0.056	0.069	-
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	0.353	0.031	0.021	0.025	0.057	0.035	0.185	-
Transformación de uso de suelo	m ² a cropeq	3 777	413	251	284	470	355	2 004	-
Calentamiento Global	ton CO ₂ eq	85.4	8.05	5.66	8.25	11.9	11.0	40.6	-

Nota. Adaptado de SimaPro, 2022.

4.1.3. Etapa de mantenimiento y rehabilitación

En esta etapa solo se consideraron dos entradas que fueron el cemento asfáltico y la maquinaria ya que solo se tomaron los datos del mantenimiento rutinario y no del periódico debido a que la construcción de la carretera es reciente y aún se encuentra en un estado óptimo por lo que solo se realizan trabajos menores. Los resultados encontrados fueron que la maquinaria fue el mayor generador de impactos ambientales en cinco de las siete categorías de impacto, incluyendo GWP (85%). Por otro lado, el cemento asfáltico fue el mayor emisor en las categorías de FRS (55%) y NLT (53%) como se muestra en la Tabla 21. Es necesario señalar que los valores de esta etapa son muy pequeños al compararse con los obtenidos en la etapa de construcción en todas las categorías de impacto.

Tabla 21.

Impactos ambientales del mantenimiento rutinario para 1 km de carretera en 1 año de operación

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Total	Cemento Asfáltico	Maquinaria
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	31.7	4.21	27.4
Formación de partículas	kg PM2.5eq	1.12	0.310	0.814
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	479	263	216
Agotamiento de minerales	kg Cu eq	1.27	0.215	1.06
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	2.97	0.927	2.04
Transformación de uso de suelo	m ² a cropeq	19.7	10.4	9.35
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	807	120	687

Nota. Adaptado de SimaPro, 2022.

4.1.4. Sistema global

Englobando los resultados de las fases que conforman el ciclo de vida de la carretera, se observó que la fase de uso es la más contaminante en seis de las siete categorías de impacto seleccionadas, seguido de la etapa de construcción y en una cantidad casi nula la etapa de mantenimiento. Como se muestra en la Tabla 22, la etapa de uso significó el 55% de impactos ambientales por GWP y más del 64% en NLT. Por otra parte, la etapa de construcción fue el mayor emisor en la categoría de FRS con 59%. Respecto a la etapa de mantenimiento, se tuvieron valores en el rango de 0.7-0.2% en todas las categorías de impacto, siendo la más relevante en FRS con 0.7%.

Tabla 22.

Impactos ambientales totales para 1 km de carretera en 1 año de operación del escenario A1.

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Total	Construcción	Uso	Mantenimiento
Toxicidad humana	ton 1,4-DB eq	7.01	2.82	4.16	0.032
Formación de partículas	ton PM2.5eq	0,498	0.238	0.259	0.001
Agotamiento de combustibles fósiles	ton oil eq	70.5	41.6	28.4	0.479
Agotamiento de minerales	ton Cu eq	0.388	0.169	0.218	0.001
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	0.596	0.240	0.353	0.003
Transformación de uso de suelo	m ² a cropeq	5 842	2 046	3 777	19.7
Calentamiento Global	ton CO ₂ eq	155	68.4	85.4	0.807

Nota. Adaptado de SimaPro, 2022.

4.2. Carretera sin mantenimiento

Se utilizó un caso hipotético para el escenario B1, en el que la carretera ya cumplió su vida útil (10 años) y durante este no se le realizó ningún mantenimiento rutinario o periódico. Según el Banco Mundial, el descuido de una carretera se ve reflejado en su mantenimiento pobre o inexistente, lo cual conlleva a consecuencias como un aumento en los accidentes de tránsito, mayor coste de operación en los vehículos que la transitan y mayor impacto ambiental por la alta emisión de partículas PM-2.5 y PM-10 (Burningham y Stankevich, 2005).

Con lo expuesto anteriormente, el modelado en SimaPro de este escenario no consideró la partida de mantenimiento rutinario o periódico, y se mantuvo constante el modelado de la fase constructiva como se muestra en la Tabla 23. Por otro lado, la variabilidad se encontró en las emisiones de partículas PM-2.5 y PM-10 en el tráfico vehicular donde, siguiendo los

lineamientos del capítulo 13.2.2 del informe AP-42, se consideró una carretera sin pavimentar de uso público. Se eligió este tipo debido a que cuando una carretera no recibe mantenimiento rutinario y/o periódico durante su ciclo de vida útil, requiere de una rehabilitación completa desde la sub-base granular hasta la carpeta asfáltica, asemejándose a una carretera sin pavimentar (Burningham y Stankevich, 2005).

Tabla 23.

Impactos ambientales totales para 1 km de carretera del escenario B1 en un año de operación

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Total	Uso	Construcción
Toxicidad humana	ton 1,4-DB eq	6.98	4.16	2.82
Formación de partículas	ton PM2.5eq	10.3	10.04	0.238
Agotamiento de combustibles fósiles	ton oil eq	70.0	28.4	41.6
Agotamiento de minerales	ton Cu eq	0.386	0.218	0.169
Acidificación terrestre	ton SO ₂ eq	0.593	0.353	0.240
Transformación de uso de suelo	m ² a cropeq	5 823	3 777	2 046
Calentamiento Global	ton CO ₂ eq	154	85.4	68.4

Nota. Adaptado de SimaPro, 2022.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Siguiendo la metodología establecida por la normativa ISO 14040 y 14044, el último paso para completar el ACV de la carretera es la interpretación y análisis de los resultados obtenidos del software SimaPro en los escenarios base y alternativos, los cuales serán explicados en las siguientes líneas. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior han logrado demostrar el gran impacto ambiental que generan las carreteras incluso si no es una vía principal o de primera clase como la Longitudinal de la Costa o la Carretera Central del Perú.

5.1. Interpretación de resultados: Fase constructiva

Con relación a esta primera etapa, de forma global fue la de mayor emisión en la categoría de FRS con 59% y el segundo en las otras seis categorías restantes. El principal generador de contaminación en varias de las categorías de impacto analizadas fue el uso de maquinaria, el cual tuvo una incidencia de más del 50% en cuatro de siete categorías como se indicó en el capítulo anterior. En la categoría de GWP y FRS, la maquinaria representó aproximadamente el 73% y 55% respectivamente. Esto se debe a su uso continuo para el movimiento de tierras y transporte de materiales, principalmente de volquetes y tractores que registraron casi 18,000 horas-máquina para un año de construcción de la vía, lo cual a su vez genera un alto consumo de petróleo diésel B2. En lo que respecta a la colocación del pavimento flexible, su mayor efecto ambiental se registró en FRS (42%), generados por la producción y traslado de los materiales usados como el bitumen y los agregados para la base y sub-base granular. Asimismo, también tuvo un impacto considerable en transformación de uso de suelo (39%), debido al cambio de uso que se le dio al terreno donde fue erigida la vía. Por otro parte, las obras de arte y drenaje, que abarcaron el uso de cemento portland, agregados, acero de refuerzo y pintura para pavimento; tuvieron el menor porcentaje de impacto ambiental en la casi

totalidad de categorías de impacto seleccionadas, llegando a un máximo de 32% en MD, producto del proceso de transformación y producción de materias primas en el concreto utilizado en obra, pinturas, barandas de seguridad y similares. La distribución en porcentajes de los valores obtenidos demuestra la alta carga ambiental que generan los vehículos de construcción de carreteras, siendo los volquetes y tractores los de mayor carga ambiental debido a los usos múltiples que se les dan en obras de infraestructura vial.

En relación a la literatura revisada de ACVs de este tipo realizados en Perú y otros países, se identificó que no todos los autores eligen las mismas categorías de impacto debido a que los objetivos y límites que plantean difieren debido a la naturaleza única de cada carretera estudiada, sobre todo en países con una variada geografía como Perú, dificultando el proceso para realizar una correcta comparación. La construcción se comparó con tres estudios realizados en Perú y dos en Estados Unidos, utilizando la categoría de GWP por ser la que usualmente se analiza en todos los estudios. Se observa en la Tabla 24 que la carretera Tacna-Collpa es la que mayor impacto genera en comparación de las otras investigaciones realizadas en Perú que llegan a representar cerca del 50% de las emisiones de este estudio (Larrea-Gallegos et al., 2017; Veran-Leigh et al., 2019). Asimismo, con el estudio de Biberos-Bendezú la diferencia se torna aun mayor, llegando a representar solo el 10% de la presente investigación (Biberos-Bendezú y Vázquez-Rowe, 2020). Una de las características más relevantes de esta comparativa es el mayor valor del impacto de GWP de la construcción de carretera que la autopista de Verán-Leigh. Esto se debe a que, al estar en un terreno accidentado (tipo 3) y escarpado (tipo 4), los trabajos de movimiento de tierras (uso de maquinaria) y uso de materiales se incrementan a comparación de un terreno plano (tipo 1) como es el caso de Verán-Leigh. Asimismo, se suma el hecho que el IMDA en la autopista Panamericana Sur es

muy distinto al de la carretera, lo cual influye en los parámetros a considerar en su diseño geométrico y posterior construcción. En el caso de Larrea-Gallegos, al tener menor IMDA y estar en una orografía tipo 1, los parámetros de diseño se reducen y, por consiguiente, la intensidad del uso de materiales y equipos en la construcción. Por otro lado, al compararse la carretera con otros dos estudios realizados en Estados Unidos, estas tuvieron emisiones 10 veces mayores que la carretera Tacna-Collpa. Esto se debe las características geométricas de los carriles y el IMDA que deben soportar en un país desarrollado como lo es Estados Unidos, lo que conlleva a tener diseños más exigentes a diferencia de los casos peruanos (Yu, 2013; Santos et al., 2017).

Es necesario precisar que cada estudio tiene diferentes consideraciones debido a las características de cada carretera como como el año en que se realizó el estudio, las dimensiones de la carretera, el periodo de análisis, el IMDA y el nivel de detalle de los datos primarios.

Tabla 24.

Comparación de emisiones en la etapa de construcción con diferentes estudios de ACV

Autor	Ubicación	Emisiones (ton CO ₂ -eq)
Tacna-Collpa ¹	Tacna, Perú	6.84E+01
Verán-Leigh ²	Lima, Perú	3.15E+01
Larrea-Gallegos ³	Madre de Dios, Perú	3.29E+01
Biberos-Bendezú ⁴	Amazonas, Perú	6.86E+00
Yu ⁵	USA	1.00E+03
Santos ⁶	Virginia, USA	9.38E+02

¹6.60 m de ancho de vía, periodo de 10 años, 561 IMDA

²14.00 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 16 995 IMDA

³5.00 m de ancho de vía, periodo de 15 años, 33 IMDA

⁴6.60 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 135 IMDA

⁵14.40 m de ancho de vía, periodo de 20 años, 70 000 IMDA

⁷7.32 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 20 000 IMDA

5.2. Interpretación de resultados: Fase de mantenimiento

La fase de mantenimiento fue determinada como la menos contaminante en comparación a la de construcción y el uso. En esta etapa solo se tuvo en consideración el cemento asfáltico para trabajos superficiales y cuatro tipos de maquinaria, a diferencia de los diez tipos durante la construcción. La maquinaria tuvo un impacto mayor en las categorías de GWP (85%), MD (84%) y HT (86%); producido netamente por la producción del equipo utilizado en el mantenimiento y su consumo de combustible; así también por las emisiones de agentes químicos durante estos trabajos y que afectan la salud de los trabajadores y personas del entorno. Por otro lado, el cemento asfáltico como único insumo utilizado, fue el mayor emisor en FRS (55%) y NLT (53%); generados por la producción del bitumen, el cual es un producto químico tóxico que tiene efectos adversos y directos sobre el suelo y ecosistema donde se aplica por los residuos que produce como los hidrocarburos poliaromáticos (Hernández et al., 2001). Finalmente, la formación de partículas PM-2.5 y PM-10 fue mínima a comparación de la fase de construcción y uso por lo que no representó ningún peligro para el personal que realiza los trabajos de mantenimiento. Es importante resaltar que los valores obtenidos solo llegan a representar hasta el 1% de impactos en todas las categorías analizada durante todo el ciclo de vida de la carretera debido a que el proyecto fue acabado a finales del año 2019 por lo que el único mantenimiento aplicable es el rutinario en el cual siempre se realizan trabajos menores (Provías Nacional, 2019b). Para lograr obtener un resultado más significativo en esta

etapa, se debería esperar que finalice el periodo de 10 años para que se realice el estudio de Plan de Gestión Vial para el desarrollo del mantenimiento periódico, donde las cantidades necesarias de insumos y maquinaria serán ampliamente mayores a comparación del rutinario por el desgaste que tendrá la carretera en todo ese periodo.

5.3. Interpretación de resultados: Fase de uso

Sobre la etapa de tráfico vehicular, el ómnibus fue el mayor emisor de impacto ambiental seguido del vehículo liviano y microbús, mientras que los otros tres tipos de vehículos que transitan por la carretera tuvieron un efecto ambiental menor. Para el caso de la categoría de GWP, a pesar de ser el segundo vehículo con menor IMDA, el ómnibus abarcó el 48% de las emisiones totales debido a que se consideró como un vehículo que transportaba a su capacidad máxima (100 personas). Mientras tanto, los vehículos ligeros y camionetas rurales, quienes fueron los de mayor IMDA, produjeron en conjunto el 23% de impactos debido a la considerable diferencia de tamaño y capacidad del ómnibus comparado con vehículos más pequeños. Asimismo, este patrón del ómnibus como el mayor contaminante se hizo presente en las categorías de FRS (48%), TA (52%) y NLT (53%), debido a las dimensiones y capacidad del vehículo y lo que conlleva su fabricación y operación. Esto queda expresado en un mayor consumo de combustible, en este caso diésel; y, por consiguiente, mayores emisiones de sulfatos, nitratos y fosfatos que terminan depositándose en el terreno donde fue construida la carretera.

Por otro lado, el vehículo liviano y la camioneta rural fueron responsables de 40% y 48% de impactos en las categorías de HT y MD respectivamente. Estos valores computados son generados por la maquinaria, equipo e insumos que se requieren para la producción y ensamble

de los vehículos automotores y, además, las emisiones de agentes químicos que generan por su creación y uso que puede llegar a producir un efecto nocivo en la salud humana durante todo su ciclo de vida. En esa misma línea, el microbús tuvo el segundo mayor impacto en FRS (14%), TA (16%) y GWP (14%). Esto se debió a que son vehículos que transportan varios pasajeros como los ómnibus, pero de menor capacidad. Asimismo, el camión unitario y acoplado fueron los de menores emisiones, llegando a tener valores que solo oscilaban entre 7-10% debido a que su IMDA era menor a comparación de los demás vehículos.

Finalmente, como un apartado adicional, se hizo el cálculo de emisiones de partículas PM-2.5 y PM-10 producidas por la re-suspensión de material suelto, desgaste de frenos y desgaste de neumáticos. De este análisis, se obtuvo que todos los vehículos que transitaron por la carretera en un año de servicio, generaron 260 kg de material particulado PM-2.5 equivalente. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que el material particulado es el contaminante que más afecta la salud de las personas, sobre todo ancianos y niños, siendo el causante a largo plazo de enfermedades como el cáncer de pulmón (OMS, 2021). Debido a esto, el MINAM desde 2016 establece los valores del Índice de Calidad del Aire (INCA), siguiendo los lineamientos de los Estándares de Calidad Ambiental de Aire (MINAM, 2016). Mediante un modelo de dispersión Gaussiano, se obtuvo la concentración de PM-2.5 en la carretera (en microgramos) por metro cúbico. En la Tabla 25 se muestra el resultado obtenido por lo que, considerando el intervalo INCA, se determinó que la calidad del aire en la zona es buena y no implica un peligro para la salud humana.

Tabla 25.

Índice de Calidad del Aire en 1 km de carretera Tacna-Collpa

Descripción	Cantidad	Unidad
PMF	1.45	µg/m ³
Intervalo INCA*	5.8	-
Clasificación*	Buena	
Cuidados*	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud	

*: Índice de Calidad del Aire, por MINAM, 2016.

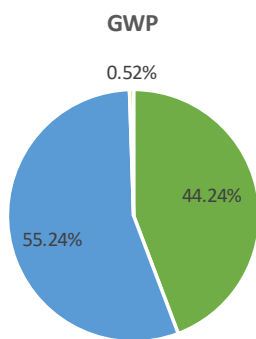
5.4. Interpretación de resultados: Sistema global

Luego de analizar por etapas los impactos ambientales del proyecto, se englobaron los valores de las siete categorías de impacto de todas las etapas para analizar cuál es la etapa más contaminante en cada categoría como se muestra en la Figura 9. Se logra apreciar que, en seis de las siete categorías de impacto, el uso de la carretera es la etapa que mayores impactos ambientales genera. Esta es mayor al 50% en las seis categorías, llegando hasta un 65% en NLT. Por otro lado, la etapa de construcción fue la mayor emisora en FRS, abarcando casi el 60% de emisiones globales. Asimismo, fue la segunda con mayor incidencia en las demás categorías, con valores desde 35% (NLT) hasta 48% (PMF). Finalmente, la etapa de mantenimiento tuvo un impacto ínfimamente bajo, sin llegar a representar más del 1% de impactos totales en todas las categorías de impacto. Esto se debe a que solo se le realizó mantenimiento rutinario y no periódico al proyecto por ser reciente y no tener un gran desgaste

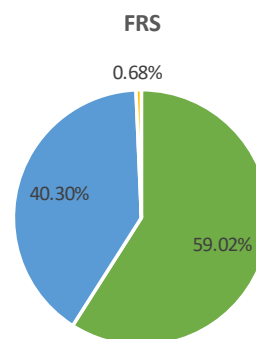
en su uso. La contribución de emisiones por parte del uso va acorde a lo revisado en la literatura debido al flujo vehicular constante que tiene la carretera, sobre todo en vehículos de pasajeros comerciales y ligeros, y que conlleva a un alto consumo de combustible. Asimismo, también se observa la importancia que tuvo la construcción en este proyecto principalmente por su ubicación geográfica y exigencias de diseño que requirió de un uso considerablemente alto de maquinaria al estar en un terreno montañoso y ondulado de una zona rural, lo que produce que las horas-maquina sean altas.



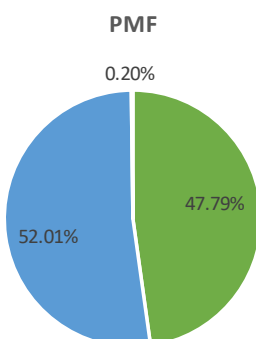
Etapa	Emisiones (ton CO ₂ -eq)
Construcción	68.4
Uso	85.4
Mantenimiento	0.807



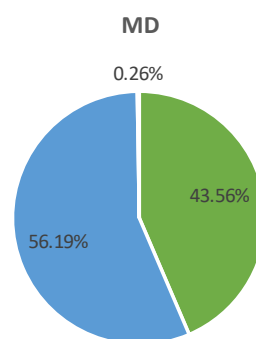
Etapa	Emisiones (ton oil eq)
Construcción	41.6
Uso	28.4
Mantenimiento	0.479



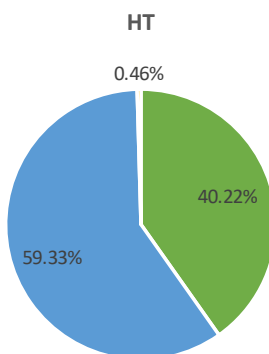
Etapa	Emisiones (ton PM _{2.5} -eq)
Construcción	0.238
Uso	0.259
Mantenimiento	0.001



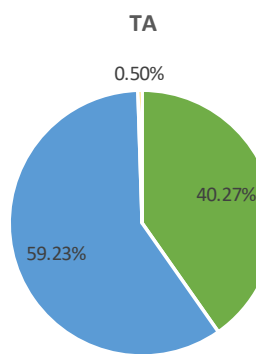
Etapa	Emisiones (ton Cu eq)
Construcción	0.169
Uso	0.218
Mantenimiento	0.001



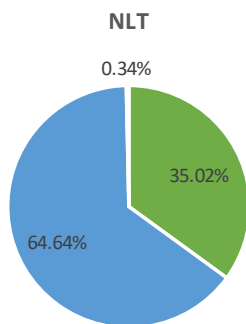
Etapa	Emisiones (ton 1.4-DB eq)
Construcción	2.82
Uso	4.16
Mantenimiento	0.032



Etapa	Emisiones (ton Cu eq)
Construcción	0.24
Uso	0.353
Mantenimiento	0.003



Etapa	Emisiones (m ² a crop eq)
Construcción	2046
Uso	3777
Mantenimiento	19.7



■ Construcción ■ Uso ■ Mantenimiento

Figura 9: Impactos ambientales por categoría de impacto

Fuente: Propia

Asimismo, se hizo una comparativa con la misma literatura previamente analizada en la fase constructiva para analizar si existe alguna tendencia de emisiones mediante porcentajes que representan cada etapa en los impactos de la categoría de GWP. Se obtuvo como resultado que la carretera Tacna-Collpa es similar al estudio de Santos et al. en la distribución de porcentajes respecto al uso y construcción (Santos et al., 2017). Por otro lado, se observa que esta carretera, ubicada en la zona andina de Perú, tiene una distribución más pareja a comparación de los otros estudios ubicados en la costa o selva peruana, donde predomina ampliamente el uso o la construcción como se muestra en la Tabla 26 (Larrea-Gallegos et al., 2017; Veran-Leigh et al., 2019; Biberos-Bendezú y Vázquez-Rowe, 2020). Asimismo, en cuatro de los cinco estudios, la fase de flujo vehicular llega a ser la más contaminante como en Tacna-Collpa, siendo más del 74% en Biberos-Bendezú y Yu; y casi el 100% en Veran-Leigh et al. como se observa en la Figura 10 (Biberos-Bendezú y Vázquez-Rowe, 2020; Yu, 2013; Veran-Leigh et al., 2019). Esto guarda relación con lo que se explicó anteriormente, cada estudio de ACV es único y tienen como investigación diferentes límites, objetivos, geografía y periodo de análisis por mencionar algunos de los parámetros que influyen en los valores de las categorías de impacto.

Tabla 26.

Comparación de ton CO₂eq con diferentes estudios de ACV durante todo el ciclo de vida.

Autor	Ubicación	Emisiones (ton CO ₂ eq)	Construcción y Mantenimiento	Uso
Tacna-Collpa ¹	Tacna, Perú	1.55E+02	44.76%	55.24%
Verán-Leigh ²	Lima, Perú	8.34E+03	0.40%	99.60%
Larrea-Gallegos ³	Madre de Dios, Perú	3.86E+01	90.55%	9.45%

Biberos-Bendezú ⁴	Amazonas, Perú	3.34E+01	20.59%	79.41%
Yu ⁵	USA	6.69E+03	25.83%	74.17%
Santos ⁶	Virginia, USA	4.26E+03	49%	51%

¹6.60 m de ancho de vía, periodo de 10 años, 561 IMDA

²14.00 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 16 995 IMDA

³5.00 m de ancho de vía, periodo de 15 años, 33 IMDA

⁴6.60 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 135 IMDA

⁵14.40 m de ancho de vía, periodo de 20 años, 70 000 IMDA

⁶7.32 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 20 000 IMDA

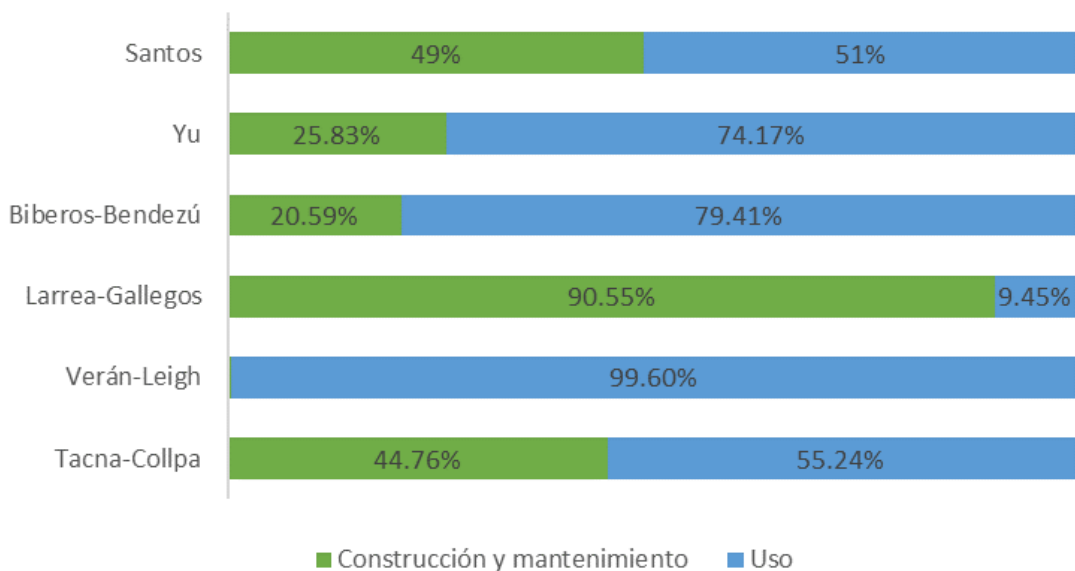


Figura 10: Comparación de emisiones de GWP con distintos estudios

Fuente: Propia

Finalmente, se generó un gráfico donde se relacionó la IMDA de cada caso de estudio con las emisiones de la categoría de Calentamiento Global como se muestra en la Figura 11, donde el segundo gráfico es un acercamiento de los estudios superpuestos en el primer gráfico. Se observa que llega a existir una tendencia lineal proporcional de los seis estudios comparados

que conforme aumenta la IMDA las emisiones de CO₂ también se incrementan. No obstante, se deberían aumentar los estudios de ACV analizados, precisamente de Latinoamérica, para tener una muestra más realista y mejorar la precisión de la tendencia lineal que se muestra en el gráfico.

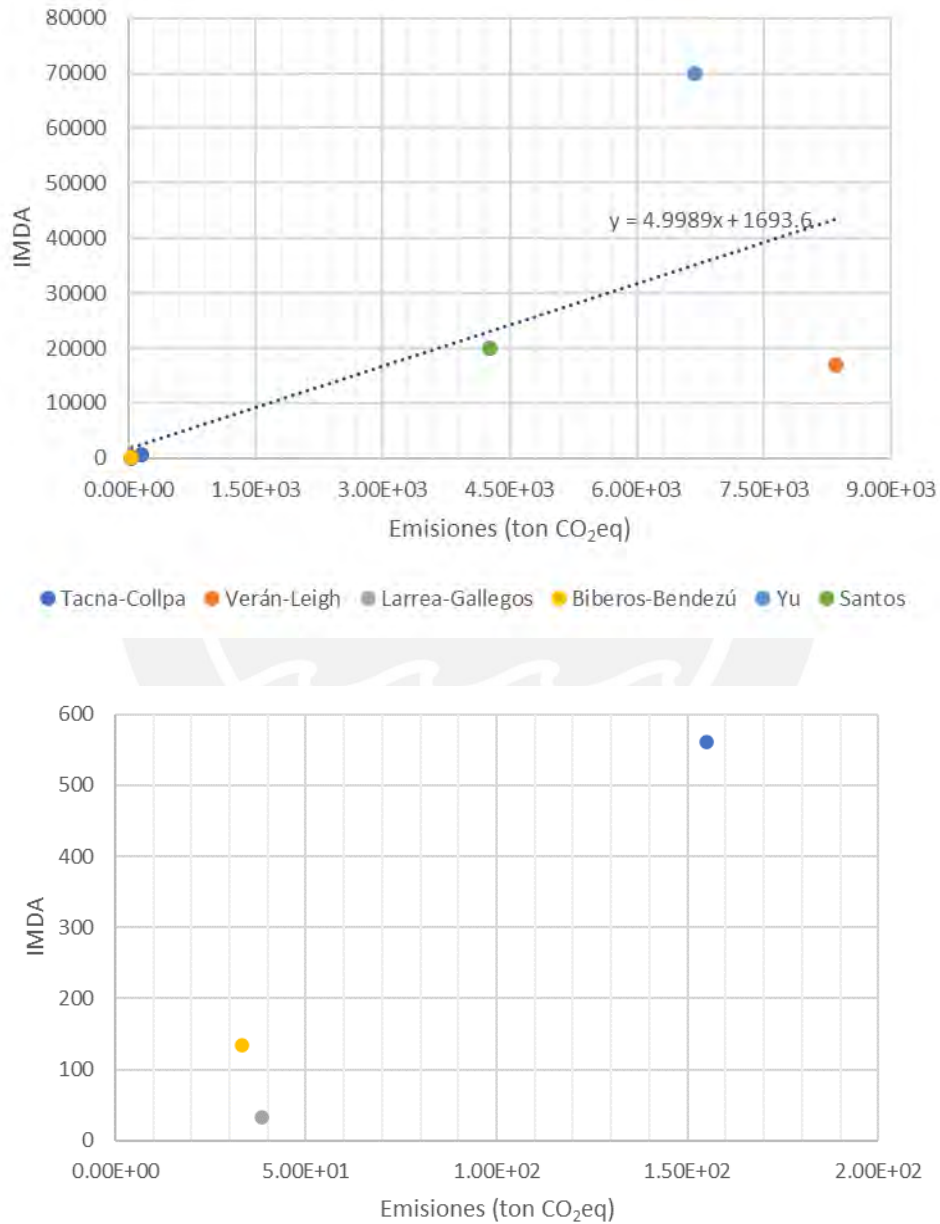


Figura 11: Relación entre IMDA y emisiones de CO₂-eq de estudios de ACV (arriba). Acercamiento de estudios superpuestos (abajo).

Fuente: Propia

5.5. Análisis de escenarios

Para el análisis de sensibilidad, se plantearon escenarios alternativos a partir del escenario base (A1), que permitió comprender de una manera más precisa la influencia que pueden tener distintos parámetros al momento de realizar la evaluación de impacto ambiental. El primer escenario alternativo en compararse fue la omisión del mantenimiento en la carretera (B1). De estos dos casos (A1 y B1) se crearon los demás escenarios para analizar, además, si el mantenimiento tenía alguna incidencia considerable en el análisis de sensibilidad. Para ambos casos, se consideró como un primer escenario el cambio de tráfico vehicular de normativa Euro III a Euro VI (A2 y B2), debido a que es una normativa que ya está siendo utilizada en países como Chile, el cual se convirtió en el primer país de Latinoamérica en implementarla (La Tercera, 2020). Asimismo, se consideró la sustitución de vehículos ligeros con carros eléctricos (A3) en el escenario base (A1) debido a que su uso se está incrementado en reemplazo de los vehículos usuales consumidores de diésel y gasolina. Finalmente, el incremento de IMDA respecto a las proyecciones para el año 2037 del estudio de tráfico (A4 y B3) fueron los últimos escenarios en analizarse.

La primera categoría que se analizó fue GWP, la cual se observa en la Figura 12. Se determina que con el uso de vehículos con normativa Euro VI (A2) y la sustitución de vehículos ligeros con autos eléctricos (A3) se logran disminuir las emisiones de CO₂ respecto al escenario base (A1). Los indicadores más altos se registraron en el escenario de incremento del tráfico vehicular (A4), llegando a aumentar en 76 ton CO₂ eq para el año 2037. Los valores resultan ser casi iguales para los escenarios alternativos de B1 ya que el mantenimiento no tuvo tanta incidencia en los impactos como se explicó anteriormente. Además, el software SimaPro no posee alguna base de datos específica para vehículos en carreteras sin mantenimiento o sin

pavimentar y no se encontró algún método que permita cuantificar mejor los impactos ambientales de vehículos que transiten en carreteras sin pavimentar en la literatura revisada.

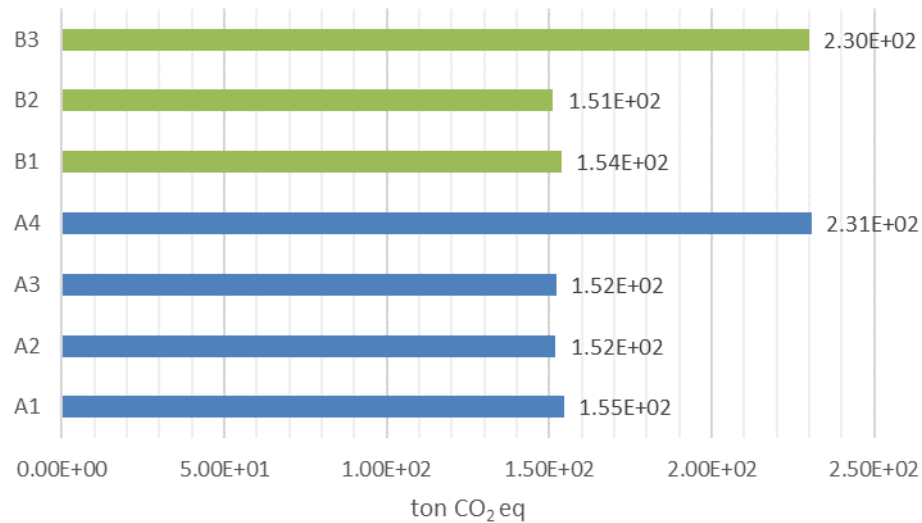


Figura 12: Impacto ambiental de GWP generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Fuente: Propia

Por otro lado, en la categoría de PMF sí se observó un cambio más considerable en las emisiones para los escenarios alternativos de A1 y B1 como se representa en la Figura 13. Sin embargo, dentro de cada caso se observa la poca variación de emisiones de material particulado a excepción de los escenarios donde se incrementa el tráfico vehicular (A4 y B3). En los casos alternativos a A1, se observó una disminución de 10 kg PM-2.5eq en vehículos con normativa Euro VI y un aumento de 20 kg PM-2.5eq con el uso vehículos eléctricos. Este aumento se debe a que las emisiones de PM por desgaste de frenos y neumáticos son ligeramente mayores en autos eléctricos según la base de datosecoinvent 3 que se utilizó para la evaluación de impacto ambiental en cada escenario. Por otro lado, la concentración más alta se registró en B3 al incrementarse el tráfico vehicular, llegando ser casi 8 ton PM-2.5eq más que B1.

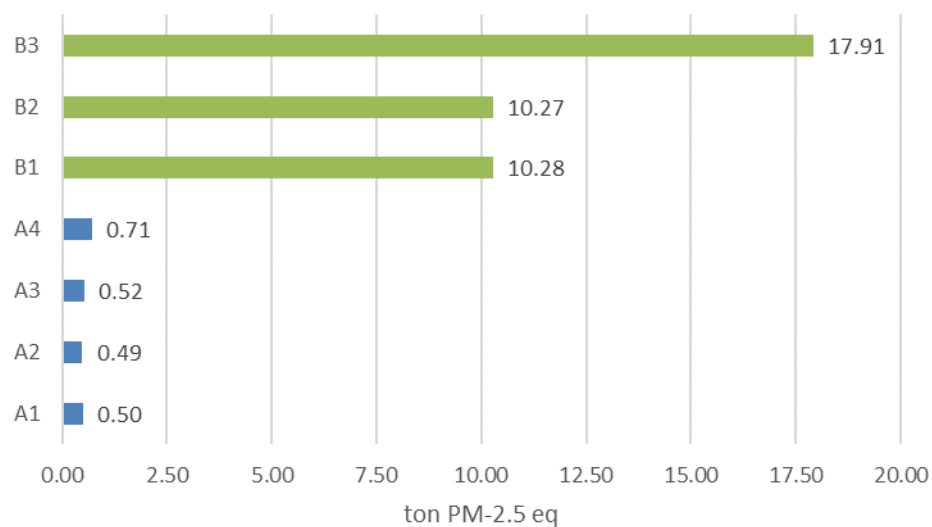


Figura 13: Impacto ambiental de PMF generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Fuente: Propia

La falta de mantenimiento causa indirectamente el incremento de emisiones en la categoría de PMF pues se observó que las emisiones de PM-2.5 se amplificaron hasta veinte veces su valor en el escenario A1. Esta variación considerable fue generada por considerarse que la expectativa de vida de 10 años de la carretera concluyó para el caso de B1 y sus escenarios alternos, incluyendo un supuesto de no realizarse ningún mantenimiento preventivo, por lo que la carretera regresó a su estado previo a la construcción de carretera sin pavimentar. Las emisiones de partículas al aire se incrementaron con este estado por lo que se utilizaron los lineamientos del capítulo 13.2.2 del informe AP-42 de la EPA para tener un aproximado de las emisiones de partículas que se generan en este tipo de carreteras (EPA, 2006). Estos valores son aproximados debido a que las constantes que se utilizan en las formulaciones son valores promedios de carreteras en Estados Unidos. Dado esto, los valores no representan precisamente las emisiones de partículas reales en el proyecto, pero nos muestran que estas se reducen al aplicarse un correcto mantenimiento a la carretera como se muestra en la Figura 14. Si se requiriera tener valores de emisiones más certeros y acordes a la realidad del proyecto, se

debería utilizar modelos y programas que permitan calcular específicamente las emisiones al aire de las partículas estudiadas como el software *MOtor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), sin embargo, el alcance de esta investigación no contempla dicho análisis.

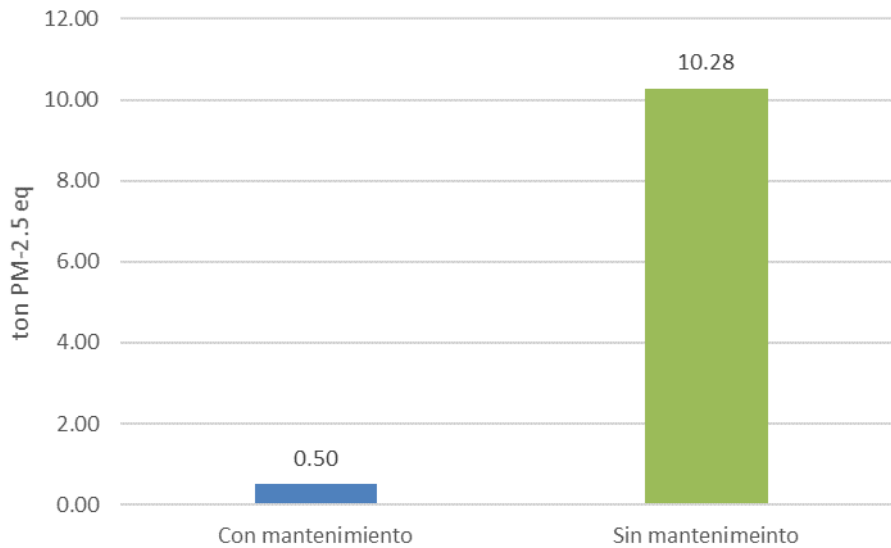


Figura 14: Comparación de PMF en la carretera con y sin mantenimiento

Fuente: Propia

Finalmente, respecto a la acidificación terrestre se observa en la Figura 15 que en el escenario con vehículos ligeros eléctricos (A3) los impactos son ligeramente mayores a comparación de los demás escenarios con excepción de los que cuentan con una mayor cantidad de vehículos (A4 y B3). Esto se debe principalmente a las grandes emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno (SOx y NOx) por la producción de baterías de litio que requieren los vehículos eléctricos a partir del refinamiento de níquel, cobre y aluminio (Pipitone et al., 2021). Respecto a los demás vehículos, la acidificación se debe por las emisiones de los tubos de escape, las cuales son mayores en vehículos de grandes dimensiones como los camiones acoplados y ómnibus, provocando que sus emisiones de TA sean similares en los escenarios analizados que tienen la misma cantidad de vehículos en la fase de uso.

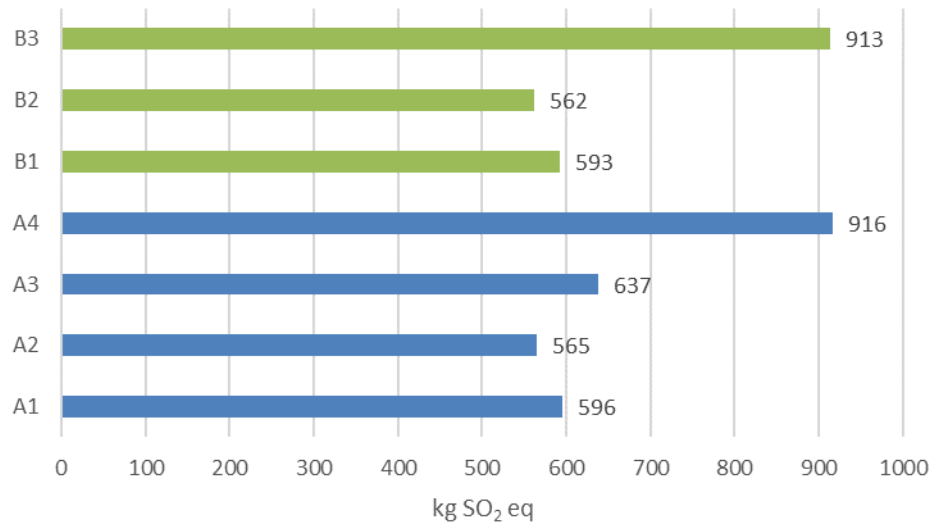
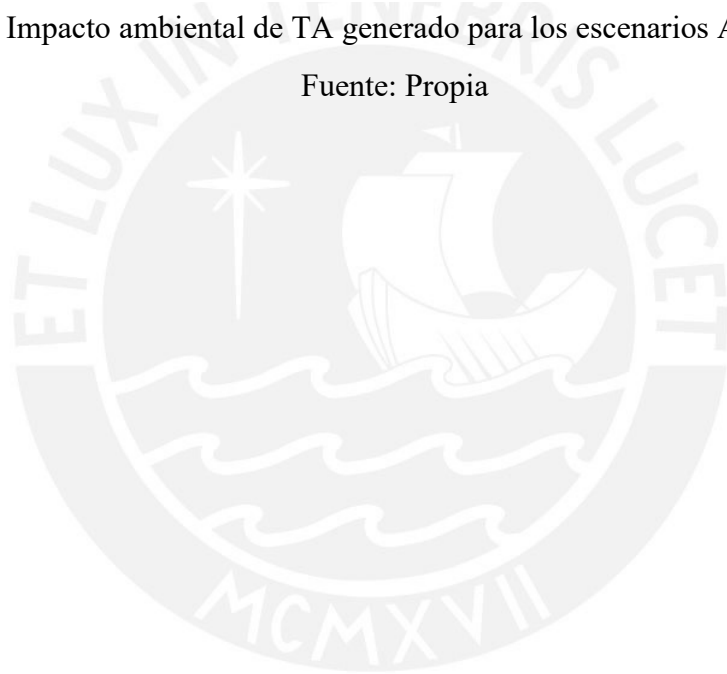


Figura 15. Impacto ambiental de TA generado para los escenarios A1-A4 y B1-B3

Fuente: Propia



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación realizada permitió conocer con mayor detalle los impactos ambientales que produce una carretera del sur de Perú en siete categorías distintas durante todo su ciclo de vida. Según la literatura revisada, este estudio de ACV ayuda a comprender mejor el comportamiento de las emisiones de una carretera en una geografía más variada como lo es la zona andina. Asimismo, permite seguir expandiendo el desarrollo de investigaciones de ACV de infraestructura vial en Perú.

En primer lugar, se logró determinar que la etapa de uso es la más contaminante de todo el ciclo de vida de la carretera como se había planteado en la hipótesis de la investigación. Los vehículos de transporte de pasajeros, ligeros y comerciales, fueron las principales fuentes de emisión en las categorías de impacto analizadas. También, el trabajo realizado por la maquinaria en el movimiento de tierras fue el causante principal de las emisiones por parte de la fase de construcción. Asimismo, el mantenimiento no resultó relevante en los impactos ambientales, teniendo valores ínfimamente menores a las etapas de construcción y uso, siendo menos del 1% de impactos del sistema global en las categorías de impacto analizadas. Esta particularidad fue generada por su reciente construcción terminada en 2020 por lo que solo se realizan trabajos de mantenimiento rutinario, donde no se requiere una cantidad de material y maquinaria considerable.

En el escenario sin mantenimiento, se observó que en casi todas las categorías de impacto los valores no varían considerablemente, a excepción del caso de PMF, donde las emisiones fueron veinte veces el valor del escenario base. La causa de este incremento fue la re-suspensión de material suelto que generan los vehículos que la transitan, el cual se incrementa en carreteras sin pavimentar, estado al que retornan las carreteras de no realizarse ningún tipo de mantenimiento.

No obstante, una fuente de incertidumbre fue el uso de combustible en este tipo de vías ya que no se tuvo información disponible sobre esta variable. Debido a esto, se debe tener en consideración esta variable para futuros estudios de ACV en carreteras que no tengan mantenimiento. Este escenario analizado muestra la influencia indirecta que tiene el mantenimiento de una carretera en los impactos ambientales, especialmente en las emisiones al aire donde, si bien se eliminan las emisiones del mantenimiento, a largo plazo tendrá efectos más nocivos para el entorno.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad mostró que si los vehículos que transitasen en la carretera tuvieran una normativa Euro VI en lugar de Euro III, contribuirían a reducir los impactos ambientales en todas las categorías estudiadas. Esto es un buen indicador para que las autoridades competentes trabajen en una pronta implementación de esta normativa como ya lo hacen otros países de Latinoamérica como Chile. También se obtuvo que con las proyecciones de tráfico del proyecto para el año 2037 los impactos ambientales, como era de esperarse, se incrementaron significativamente por la mayor afluencia de vehículos al ser una importante ruta de turismo y comercio entre Perú y Bolivia, la cual seguirá creciendo con el pasar de los años.

Asimismo, la comparación con otros tres estudios de ACV en otras regiones de Perú y dos en Estados Unidos reveló que las emisiones de GEI aumentan conforme el número de vehículos que transiten en la carretera sea mayor. También, se encontró que las carreteras en Perú no presentan un comportamiento habitual de impactos en las diferentes etapas de su ciclo de vida pues varían en concordancia a la ubicación geográfica de cada una y sus parámetros de diseño. Por ejemplo, la distribución de las emisiones de construcción y uso del estudio son más parejas, mientras que en el estudio de Biberos-Bendezú de características similares tiene una mayor distribución en la fase de uso. No obstante, el estudio siguió la tendencia de que las emisiones de uso son la de mayor impacto ambiental como cuatro de los cinco proyectos de ACV analizados.

Debido a esto, una de las principales recomendaciones es incentivar el uso de biocombustibles en la maquinaria pesada utilizada en la construcción y en los vehículos que transiten por la carretera como el biodiesel B20 (con 20% de biocarburante), que puede ayudar a reducir hasta un 50% de emisiones de CO₂, 45% de PM y 8% de SO_x (Llanes et al., 2017; Karlsson et al., 2020). Del mismo modo, usar gas natural en las plantas productoras de asfalto y agregados ayuda a reducir hasta un 65% las emisiones de CO₂ mientras que las técnicas de reciclaje en frío in-situ las reducen en 52% cuando se utilizan materiales reciclados en vez del asfalto convencional (Liu et al., 2022).

Por lo anteriormente expuesto, el proyecto analizado contribuye a la incorporación de políticas de mitigación de emisiones de GEI en Perú desde el ámbito constructivo, estando en un contexto actual donde el cambio climático está en un periodo crítico según el informe 6 de la IPCC. Esto reafirma que el uso de ACV permitirá a futuros proyectos viales similares reducir sus impactos ambientales desde su diseño geométrico hasta la selección de materiales sostenibles y maquinaria menos contaminante. También muestra la importancia indispensable que tiene el mantenimiento constante de las carreteras en la reducción de emisiones, lo que invita a seguir sumando esfuerzos a las entidades competentes como Provías Nacional para la pavimentación de toda la Red Vial Nacional pues aún existe un 20% de carreteras sin pavimentar.

Finalmente, es importante seguir incrementando los estudios de ACV en carreteras de Perú por la vasta biodiversidad que este posee, un factor muy influyente para los impactos ambientales. Esto con el objetivo de lograr tener una mejor toma de decisiones en cuestiones ambientales al momento de ejecutar proyectos viales.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, E. (2017). *ANÁLISIS SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL EN EL PERÚ DESDE EL ENFOQUE DE LA ARQUITECTURA*. Lima.
- Arroyave, M., Gomez, C., Gutiérrez, M., Múnera, D. P., Zapata, P. A., Vergara, I. C., . . . Andrade, L. M. (2006). IMPACTOS DE LAS CARRETERAS SOBRE LA FAUNA SILVESTRE Y SUS PRINCIPALES MEDIDAS DE MANEJO. *Revista EIA*, 45-57.
- Auerbach, M., Herrmann, C., y Krieger, B. (2011). KLIWAS Impacts of Climate Change on Waterways and Navigation in Germany. *Adaptation of the Road Infrastructure to Climate Change*, 48-53. Berlin: KLIWAS.
- Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., y Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation & Recycling*, 132, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
- Biberos-Bendezú, K., y Vázquez-Rowe, I. (2020). Environmental impacts of introducing cable cars in the Andean landscape: A case study for Kuelap, Peru. *Science of the Total Environment* (718), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137323>
- Burningham, S., y Stankevich, N. (2005). *Why road maintenance is important and how to get it done*. Washington D.C.: The World Bank.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- Chapa, J. (2016). *LA DEFICIENTE FISCALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL COMO FACTOR AGRAVANTE DE LA CONTAMINACIÓN DERIVADA DE ACTIVIDADES MINERO- EXTRACTIVAS*. Lima.
- Chowdhury, R., Apul, D., y Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>

- Coelho Junior, L., da Costa Martins, K., y Carvalho, M. (2019). Carbon Footprint Associated with Firewood Consumption in Northeast Brazil: An Analysis by the IPCC 2013 GWP 100y Criterion. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 2985–2993.
- <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0282-1>
- COSIPLAN. (2017). *FICHA DE PROYECTO*. COSIPLAN. Obtenido de: http://iirsa.org/proyectos/detalle_proyecto.aspx?h=1349
- Creutzig, F. (2015). Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation. *Transport Reviews*, 36(3), 341-360.
- <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1079277>
- Cuya, O. (6 de Mayo de 2013). ¿Por qué los estudios de impacto ambiental son deficientes? Algunas conjeturas para su explicación. Obtenido de: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/alessandra/2013/05/06/por-qu-los-estudios-de-impacto-ambiental-son-deficientes-algunas-conjeturas-para-su-explicaci-n/>
- EMEP-Corinair. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: 1.A.3.b.iv Road transport 2019*. European Environment Agency. Obtenido de: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- EPA. (2006). *AP-42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources: Unpaved roads*. EPA. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/13.2.2_unpaved_roads.pdf
- EPA. (2011). *AP-42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources: Paved roads*. EPA. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/13.2.1_paved_roads.pdf
- EPA. (2014). *Brake and Tire Wear Emissions from On-road Vehicles in MOVES2014*. EPA.
- Eskola, P., Wellman, K., Mroueh, U.-M., Laine-Ylijoki, J., Ruotoistenmäki, A., Mäkelä, E., y Juvankoski, M. (2000). *Life cycle assessment of road construction*. Helsinki: Tielaitoksen selvityksiä. Recuperado el 24 de Abril de 2021

- Gobierno Regional de Tacna. (13 de Abril de 2021). UNIENDO ESFUERZOS POR EL TURISMO INTERNACIONAL. Tacna, Tacna, Perú. Obtenido de: <http://www.regiontacna.gob.pe/visor/noticia/NO00008109>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., . . . Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, 45, 90-96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hernández Michaca, J., Sánchez Granados, V. M., Castillo Chaires, I., Damián Hernández, S., y Téllez Gutiérrez, R. (2001). *IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS CARRETEROS. EFECTOS POR LA CONSTRUCCION Y CONSERVACION DE SUPERFICIES DE RODAMIENTO: I PAVIMENTOS FLEXIBLES*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.
- Huang, Y., Bird, R., y Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17, 283-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
- INEI. (2020). *PBI de las Actividades Económicas, por años*. Recuperado el 24 de Abril de 2021, de Instituto Nacional de Estadística e Informática. Obtenido de: <http://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/pbi-de-las-actividades-economicas-por-anos-9096/>
- Instituto Peruano de Economía. (2008). *Lecciones del Mantenimiento de Carreteras en el Perú, 1992 - 2007*. Lima: AFIN.
- IPCC. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de: https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- ISO. (2006a). *ISO 14040. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. International Standards Organization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. International Organization for Standardization.

Ivel, J., Watson, R., Abbassi, B. y Salem, Z. (2020). Life cycle analysis of concrete and asphalt used in road pavements, Canada. *Environmental Engineering Research*, 25, 52-61.

<https://doi.org/10.4491/eer.2018.399>

Karlsson, I., Rootzén, J., y Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109651>

Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., y Gallice, G. (2017). 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*, 22, 1109-1124.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1221-7>

La Tercera (2020). Chile será el primer país de Sudamérica en exigir la norma de emisiones Euro 6

<https://www.latercera.com/mtonline/noticia/chile-sera-el-primer-pais-de-sudamerica-en-exigir-la-norma-de-emisiones-euro-6/EZECJNTOI5HNTBWVVVCTALVNGM/>

Li, J., Xiao, F., Zhang, L., y Amirkhanian, S. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 1182-1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>

Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P., Xue, S., Yu, Q. y Li, Q. (2022). Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9 (4), 532-555. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.06.001>

Liu, Y., Wang, Y., Li, D., Feng, F., Yu, Q., y Xue, S. (2019). Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle

- assessment: A case from China. *Journal of Cleaner Production*, 743-752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.081>
- Llanes, E., Rocha-Hoyos, J., Salazar, P. y Medrano, J. (2017). Producción e Impacto del Biodiesel: Una Revisión. *INNOVA Research Journal* (2), 59-76. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6069992.pdf>
- Loijos, A., Santero, N., y Ochsendorf, J. (2013). Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network. *Resources, Conservation and Recycling* (72), 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.014>
- MINAM. (2005). *Ley General del Ambiente*. Lima.
- MINAM. (2016). *Índice de Calidad del Aire*. Lima.
- MTC. (2003). *Reglamento Nacional de Vehículos*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2006). *Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial*. Lima: DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS Y FERROCARRILES.
- MTC (2013) Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción - EG-2013. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2016). *Red Vial Nacional*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Obtenido de: https://portal.mtc.gob.pe/logros_red_vial.html
- MTC. (2017a). *Aprueban Reglamento de Protección Ambiental para el Sector Transportes*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Obtenido de: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-reglamento-de-proteccion-ambiental-para-el-sector-t-decreto-supremo-n-004-2017-mtc-1487028-1/>
- MTC. (2017b). *Ministerio de Transportes y Comunicaciones*. Asuntos Ambientales / Guías y manuales. Obtenido de: <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/socioambientales/guiasymanuales.html>
- MTC. (2018). *MANUAL DE CARRETERAS: DISEÑO GEOMÉTRICO-DG*. Lima: DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS Y FERROCARRILES.

- MTC. (2019a). *RED VIAL DEL SISTEMA NACIONAL DE CARRETERAS, POR SUPERFICIE DE RODADURA EXISTENTE, 1990-2019*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2019b). *Diario Gestión*. MTC aseguró pavimentar el 90% de la Red Vial Nacional y 70% de la Departamental para 2021. Obtenido de: <https://gestion.pe/economia/mtc-aseguro-pavimentar-90-red-vial-nacional-70-departamental-2021-nndc-267313-noticia/?ref=gesr>
- MTC. (2021a). *Inversión en carreteras creció un 194% en enero sumando 24.11 millones de dólares*. Lima: Revista PERÚ CONSTRUYE. Obtenido de: <https://peruconstruye.net/2021/02/25/inversion-en-carreteras-crecio-un-194-en-enero-sumando-24-11-millones-de-dolares/>
- MTC. (2021b). *Construcción de 15 mil km de carreteras y mejoras en puertos reducirán costos logísticos en el país*. Lima: Revista PERÚ CONSTRUYE. Obtenido de: <https://peruconstruye.net/2021/03/01/construccion-de-15-mil-km-de-carreteras-y-mejoras-en-puertos-reduciran-costos-logisticos-en-el-pais/>
- OMS. (2021). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. OMS. Obtenido de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- PELCAN. (2021). *Presentación PELCAN*. PELCAN. Obtenido de: <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/sobre-la-red-ciclo-de-vida/presentacion/>
- Pipitone, E., Caltabellotta, S., y Occhipinti, L. (2021). A Life Cycle Environmental Impact Comparison between Traditional, Hybrid, and Electric Vehicles in the European Context. *Sustainability*, 13(19), 1-32.
- <https://doi.org/10.3390/su131910992>
- PRé Sustainability. (29 de Agosto de 2016). *ReCiPe*. PRé Sustainability. Obtenido de: <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>
- Provías Nacional. (2019a). *ESTADO DE LA SUPERFICIE DE RODADURA A DIC 2019*. Provías Nacional. Obtenido de: <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2021/02/rvn-estado-2019.pdf>

- Provías Nacional. (2019b). *SE CULMINARÁ EL PRIMER TRAMO DE LA CARRETERA TACNA – COLLPA*. Provías Nacional. Obtenido de: <https://www.pvn.gob.pe/noticias/se-culminara-el-primer-tramo-de-la-carretera-tacna-collpa/>
- Provías Nacional. (2021). *MTC ejecutó 264 kilómetros de carreteras nacionales en el 2020*. Lima. Obtenido de: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/323984-mtc-ejecuto-264-kilometros-de-carreteras-nacionales-en-el-2020>
- Queiroz, C., y Gautam, S. (1992). *Road Infrastructure and Economic Development: Some Diagnostic Indicators*. Washington D.C.: The World Bank.
- ReCiPe. (11 de Febrero de 2018). *National Institute for Public Health and the Environment*. LCIA: the ReCiPe model. Obtenido de: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- RIVM. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment.
- Rubio, M. D., Moreno, F., Martínez-Echevarría, M. J., Martínez, G., y Vázquez, J. M. (2013). Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 41, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
- Santero, N., Masanet, E., y Horvath, A. (2010). *Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association.
- Santos, J., Flintsch, G., y Ferreira, A. (2017). Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 15-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025>
- SCMO. (9 de Agosto de 2019). *SCMO. WHAT IS THE LENGTH OF ALL THE ROADS IN THE WORLD?*. Obtenido de: <https://www.scmo.net/faq/2019/8/9/how-much-roads-is-there-is-the-world>

- SEACE. (2021). *CONTRATACIÓN DEL SERVICIO DE GESTIÓN Y CONSERVACIÓN POR NIVELES DE SERVICIO DEL CORREDOR VIAL: ILO - TACNA - TRIPARTITO y OVALO TRIPARTITO – COLLPA*. Obtenido de: <https://prodapp2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/fichaSeleccion/fichaSeleccion.xhtml?ptoRetorno=LOCAL>
- SimaPro. (2021a). *ecoinvent LCI database*. SimaPro. Obtenido de: <https://simapro.com/databases/ecoinvent/>
- SimaPro. (2021b). *About Simapro*. SimaPro. Obtenido de: <https://simapro.com/about/>
- SimaPro MX. (2021). *SimaPro. Bases de datos*. Obtenido de: <http://simapro.mx/datos.html>
- TDM. (2019). *Emulsiones para imprimación en la construcción de carreteras*. Obtenido de: <https://www.tdm.com.pe/noticias-56-emulsiones-para-imprimacion/>
- UNACEM. (2013). *TABLA DE DOSIFICACIONES Y EQUIVALENCIAS*. Obtenido de: <https://www.unacem.com.pe/wp-content/uploads/2014/12/TblDOSIF.pdf>
- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., y Sánchez, I. (2019). Perú LCA: launching the Peruvian national life cycle database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*(24), 2089-2090. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01668-w>
- Verán-Leigh, D., Vázquez-Rowe, I., y Larrea-Gallegos, G. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American highway in Peru using life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1496-1514. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1574-1>
- World Resources Institute. (2019). *Historical GHG Emissions*. Climate Watch Data. Obtenido de: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2018§ors=total-including-lucf&start_year=1990
- Yu, B. (2013). *Environmental Implications of Pavements: A Life Cycle View*. Tampa: ProQuest LLC.