

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS URBANOS EN AREQUIPA APLICANDO LA METODOLOGÍA ISO 14040”

Tesis Presentada por la Bachiller:

Gómez Oré, Paula Adriana Tatiana

Para optar por el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. Tejada Calderón, Juan Carlos

Arequipa, Perú

2018

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS CIVIL Y DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

VISTO

El BORRADOR DE TESIS Titulado:

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS
URBANOS EN AREQUIPA APLICANDO LA METODOLOGÍA
ISO 14040

Presentado por el (la) (los) Bachiller (es):

PAULA ADRIANA TATIANA GOMEZ ORE

Nuestro DICTAMEN es:

CONFORME.

OBSERVACIONES:

Arequipa, 13 de NOVIEMBRE del 2018

[Firma]
COD. 2530

[Firma]
COD. 2564

[Firma]
Reg.
Cod. 2044



A mi familia de siete, por estar siempre.

RESUMEN

La infraestructura vial es un factor trascendental en el desarrollo de las ciudades, si bien se tiene una noción general de los impactos ambientales generados de la construcción de vías no existen en nuestro medio estudios comparativos que tomen en cuenta las condiciones del medio y que permitan una toma de decisiones acertada en materia ambiental.

En esta investigación se realiza el análisis de dos métodos de pavimentación urbana ampliamente utilizados en Arequipa el pavimento flexible y el pavimento articulado de concreto, el cual ha ganado popularidad durante los últimos años. Para determinar los impactos ambientales generados por ambos modelos se empleó la metodología del análisis de ciclo de vida, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14040:2006, que consiste en considerar los ingresos (recursos y energía) y egresos (emisiones al medio y desechos) de una actividad o producto a lo largo de las etapas de su vida: extracción y producción de los materiales, transporte, construcción, operación y fin de vida. Se utilizó el software OpenLCA 1.7.0, las bases de datos EcoInvent V3, ELDC y la metodología TRACI 2.1, que permite analizar categorías de impacto como el potencial de calentamiento global y la formación de smog.

Los resultados obtenidos mostraban que la etapa de construcción representaba entre el 75% y 85% de las emisiones totales para ambos modelos y el calentamiento global fue la categoría con resultados más altos donde el pavimento articulado genero 1.4 veces más emisiones de CO₂ que el pavimento flexible aun cuando este último supero a su par en siete de las nueve categorías analizadas. Se analizaron dos escenarios adicionales modificando el índice medio diario de vehículos y el índice de rugosidad de donde se concluyó que el pavimento articulado de concreto es el más adecuado para vías con baja densidad vehicular, pero que es preferible utilizar pavimentos flexibles en vías con tránsito medio a alto, debido a que las vías adoquinadas generan emisiones mucho mayores cuando son sometidas a volúmenes altos de tránsito.

Palabras Clave: Pavimentos Urbanos, Impacto Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida en Pavimentos.

ABSTRACT

The road infrastructure is a decisive factor in the development of cities, nevertheless there is a general notion of the environmental impacts generated by the construction of roads. Comparative studies that take into account the environmental conditions and allow a successful decision making in environmental matters do not exist in the actual context.

In this research, the analysis of two urban paving methods widely used in Arequipa is carried out, the models analysed were flexible pavements and concrete block pavement (CBP), which has gained popularity during the last years. In order to determine the environmental impacts generated by both models the life cycle analysis methodology was used, following the guidelines of the ISO 14040:2006 standard, which consists in considering the inputs (resources and energy) and outputs (emissions to the environment and waste) of an activity or product throughout the stages of its life: extraction and production of materials, transport, construction, operation and end of life. OpenLCA 1.7.0 software was used as well as EcoInvent V3 databases, ELDC and TRACI 2.1 methodology, which allows to analyze impact categories such as global warming potential and smog formation.

The results displayed that the construction stage represented between 75% and 85% of the total emissions for both models and global warming was the category with the highest results where CBP generated 1.4 times more CO₂ emissions than flexible pavement even when the latter exceeded its peer in seven of the nine categories analyzed. Two additional scenarios were analyzed by modifying the average daily vehicle index and the roughness index from which it was concluded that CBP pavement is the most suitable for roads with low vehicular density, but it is preferable to use flexible pavements on roads with medium to high traffic, because CBP roads generate much greater emissions when they are subjected to high volumes of traffic.

Keywords: Urban paving, Environmental Impact, Life cycle assessment of pavement

INTRODUCCIÓN

Se considera que el desarrollo de una comunidad, ciudad o país está íntimamente ligado a la eficiencia de su red vial. El crecimiento poblacional de la ciudad de Arequipa ha generado un incremento acelerado y caótico del parque automotor, de 112 mil unidades en el 2006 a 182 mil en el 2011 (MTC, 2016), creando la necesidad de brindar mayor comodidad, eficiencia y seguridad a los usuarios de las vías en la urbe.

Dicho objetivo implica la utilización de metodologías que permitan tomar una decisión acertada acerca de las posibles opciones de mejoramiento de las vías, considerando una perspectiva ambiental. Durante los últimos años las autoridades municipales han optado por pavimentar las vías con adoquines de concreto en lugar de pavimentos flexibles y rígidos, seguramente impulsado por los beneficios económicos implicados. Sin embargo, no se ha analizado ni cuantificado el impacto ambiental de ambas opciones para determinar si una implica realmente mayores beneficios que otra.

El análisis del ciclo de vida (ACV) de los pavimentos es un método que facilita a la institución vial escoger la estrategia técnico económico que proveerá el desempeño ambiental más eficiente del pavimento, mediante la cuantificación del uso de recursos y emisiones ambientales que se desprenden de los sistemas de pavimentación que se está evaluando. Se recopilan y cuantifican las entradas y salidas (flujos) del sistema analizado durante su ciclo de vida, considerando la materia prima, manufactura y el transporte de esta al lugar de instalación, la operación de la vía durante la vida útil del pavimento y la disposición final de escombros.

Conforme a las normas internacionales ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, un ACV se realiza en 4 fases, siendo la primera la definición del objetivo y el alcance. La segunda etapa es el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) donde se consideran todos los inputs (materiales, energía) y outputs (emisiones, desechos) del sistema.

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida evalúa la trascendencia potencial de los impactos basados en los resultados del ICV. Se asigna los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas, y se mide el impacto, es decir, se realiza el cálculo de los resultados de indicadores de categoría.

Finalmente se realiza la interpretación. El resultado pretende cuantificar y comparar dos sistemas de pavimentación usados en la ciudad Arequipa, pavimentos asfálticos y pavimentos de adoquines de concretos articulados para definir cuál es el método más eficiente en términos de sus impactos medioambientales.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.1. Identificación y descripción del problema	1
1.1.2. Enunciado del Problema	2
1.1.3. Tipo de Investigación	2
1.1.4. Nivel de Investigación	2
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.2.1. Objetivos Generales	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. HIPÓTESIS	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. ANALISIS DE CICLO DE VIDA	4
2.1.1. Historia del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	4
2.1.2. Análisis de Ciclo de Vida en pavimentos	5
2.1.3. Fases del Ciclo de Vida	7
2.2. PAVIMENTOS URBANOS	9
2.2.1. Pavimentos flexibles con carpeta asfáltica en frío	9
2.2.2. Pavimentos articulados de concreto	11
2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS VIAS URBANAS	12
2.4 OPERACIÓN DE VIAS URBANAS	13
2.4.1. Albedo	13
2.4.2. Índice de rugosidad internacional (IRI)	14
2.4.3. Gasto de combustible debido a rugosidad	14
2.5. LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS EN EL PERÚ	16
2.5.1. El Perú en el contexto global.	16
2.5.2. Características del mercado peruano.	18
2.5.3. Petróleo y sus derivados.	19
3. METODOLOGÍA	21
3.1. UTILIZACIÓN DE SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE ACV	21
3.1.1. OpenLCA 1.7.0	21
3.1.2. Método de Evaluación de Impactos TRACI 2.1	21
3.1.3. Ecoinvent V3.4 y ELCD 3.2	25
3.2. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS SEGÚN ISO 14040	26
3.2.1. Definición de Objetivo y Alcance.	26

3.2.2. Descripción de los sistemas a ser comparados	27
3.2.3. Límite de los sistemas	30
3.3. DESARROLLO DEL MODELO	31
3.3.1. Selección de las vías ser estudiadas	31
3.3.2. Cuantificación de flujos y Análisis de Inventario	31
3.3.3. Uso del Software OpenLCA 1.7.0	35
3.3.4. Creación de los procesos	37
3.3.5. Montaje del ciclo de vida	41
3.3.6. Caracterización	41
3.3.7. Obtención y presentación de los resultados	42
3.3.8. Análisis comparativo de los resultados	43
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	44
4.1. INDICADORES AMBIENTALES TRACI 2.1	44
4.1.1. Modelo 1. Pavimento Flexible en Frio.	44
4.1.2. Modelo 2. Pavimento Articulado de Concreto	47
5. ANALISIS Y EVALUACION DE RESULTADOS	50
5.1. COMPARACIÓN POR CATEGORIA DE IMPACTO	50
5.1.1. Formación de Smog	50
5.1.2. Potencial de Calentamiento Global	51
5.1.3. Agotamiento de ozono estratosférico	51
5.1.4. Acidificación	52
5.1.5. Potencial de ecotoxicidad	53
5.1.6. Eutrofización	53
5.1.7. Criterios de Salud Humana	54
5.1.8. Resultados Globales	55
5.2. COMPARACIÓN CON VARIACIÓN DE FACTORES	56
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXO 1: CONSIDERACIONES PARA PAVIMENTO FLEXIBLE	70
ANEXO 2: CONSIDERACIONES PARA PAVIMENTO ARTICULADO DE CONCRETO	72
ANEXO 3: EMISIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	74
ANEXO 4: EMISIONES DEL PAVIMENTO ARTICULADO DE CONCRETO	78

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valores de Rugosidad Admisible IRI (m/km) según Tipo de Carretera. (Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos,2013)</i>	16
<i>Tabla 2. Valores equivalentes de CO₂ para gases.</i>	22
<i>Tabla 3. Valores para el cálculo del impacto del albedo en pavimentos urbanos. Elaboración propia</i>	32
<i>Tabla 4. Valores para el cálculo del IRI proyectado en pavimento flexible. Elaboración propia</i>	32
<i>Tabla 5. Valores de Rugosidad Admisible IRI (m/km) según Tipo de Carretera. (Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos)</i>	33
<i>Tabla 6. Cálculo del consumo de combustible por rugosidad. Elaboración propia</i>	35
<i>Tabla 7. Actividades de extracción, producción y construcción consideradas en los procesos unitarios. Elaboración propia.</i>	38
<i>Tabla 8. Impactos potenciales durante la etapa de construcción del modelo 1 (Pavimento flexible)</i>	44
<i>Tabla 9. Impactos potenciales durante el ciclo de vida del modelo 1 (Pavimento flexible)</i>	46
<i>Tabla 10. Impactos potenciales durante la etapa de construcción del modelo 2 (Pavimento articulado)</i>	47
<i>Tabla 11. Impactos potenciales durante el ciclo de vida del modelo 2 (Pavimento articulado).</i>	49
<i>Tabla 12. Comparación entre Modelo 1 y 2 para las categorías TRACI 2.1</i>	55
<i>Tabla 13. Impactos Ambientales en pavimento flexible para los escenarios analizados.</i>	57
<i>Tabla 14. Impactos ambientales para pavimento articulado en los escenarios analizados</i>	58
<i>Tabla 15. Variación de impacto entre los escenarios 1 y 3 para ambos modelos.</i>	59
<i>Tabla 16. Comparación de los resultados para el escenario 3 (Vías sin mantenimiento y tráfico) para ambos modelos.</i>	60
<i>Tabla 17. Resultados para categoría de calentamiento global para diferentes IMDA, donde 7500 es la capacidad máxima.</i>	61
<i>Tabla 18. Comparación entre ECAs para aire y resultados obtenidos</i>	64

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Relación entre las fases del ACV. Fuente. Adaptado de la norma ISO 14040:2006</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 Sección transversal típica de los pavimentos articulados. Extraído de la norma NTP CE.010.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 Valores de rugosidad para distintos tipos de pavimentos. (Sayers Y Karamihas,1998).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Variación en el consumo de combustible debido a rugosidad. (Zaabar, I., Chatti, K.2010.)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Indicadores de producción y consumo de combustibles. British Petroleum y MEM. Elaboración OEE-Osinergmin.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6. Consumo de combustibles por sectores económicos. 2012. (MEM. Elaboración OEE-Osinergmin)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 Ciclo de vida de pavimentos y procesos considerados en ellas. Elaboración propia.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8. En rojo, la calle Miguel Grau y Prolongación, pavimentada con adoquines y en azul, la av. Arequipa, pavimentada con asfalto en frio. (Google Earth, 2015).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9. Límites del sistema para el modelo del modelo 1. Elaboración propia</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10. Límites del sistema para el modelo del modelo 1. Elaboración propia</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11. Valores de variación en consumo de combustible debido a IRI. Zaabar y Chatti.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12. Representación esquemática de los elementos de la base de datos. Elaboración propia</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13. Creación de un flujo nuevo en el software OpenLCA (OpenLCA).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14. Organización de procesos en base de datos e información general de un proceso de inventario. (OpenLCA).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15. Entradas y salidas para el proceso unitario de operación de pavimento articulado. OpenLCA</i>	<i>39</i>
<i>Figura 16. Diagrama de flujos de procesos para pavimento asfáltico. Elaboración Propia</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17. Diagrama de flujo de procesos para pavimento articulado. Elaboración Propia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18. Creación de un producto sistema. Montaje del ciclo de vida. OpenLCA.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19. Aplicación de TRACI 2.1 al ciclo de vida del articulado. OpenLCA</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20. Resultados por categoría de impacto ambiental. TRACI 2.1. OpenLCA.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 21. Proceso considerado en la tabla 7. Elaboración propia</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22. Incidencia de las etapas de construcción en las categorías de impacto. Modelo 1. Elaboración propia.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Proceso considerado en la tabla 8. Elaboración propia</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Incidencia de las etapas del ciclo de vida en las categorías de impacto. Modelo 1. Elaboración propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Proceso considerado en la tabla 9. Elaboración propia</i>	<i>47</i>
<i>Figura 26. Incidencia de la etapa de construcción en las categorías de impacto. Modelo 2. (Elaboración propia)</i>	<i>48</i>
<i>Figura 27. Proceso considerado en la tabla 10. Elaboración propia</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Incidencia por etapas en las categorías de impacto. Modelo 2. (Elaboración propia).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 29. Formación de Smog. (Elaboración Propia).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 30. Potencial de Calentamiento global (Elaboración Propia)</i>	<i>51</i>

<i>Figura 31. Agotamiento de Ozono. (Elaboración Propia)</i>	52
<i>Figura 32. Acidificación. (Elaboración Propia)</i>	52
<i>Figura 33. Eco toxicidad. (Elaboración Propia)</i>	53
<i>Figura 34. Eutrofización. (Elaboración Propia)</i>	54
<i>Figura 35. Criterios de salud humana. Sustancias Cancerígenas, no Cancerígenas y Efectos Respiratorios. (Elaboración Propia)</i>	54
<i>Figura 36. Comparación global entre Modelo 1 y 2 para las categorías TRACI 2.1. a lo largo del ciclo de vida. (Elaboración Propia)</i>	56
<i>Figura 37. Impactos Ambientales en pavimento flexible para los escenarios analizados. (Elaboración propia)</i>	57
<i>Figura 38. Impactos ambientales para pavimento articulado en los escenarios analizados. (Elaboración propia)</i>	58
<i>Figura 39. Comparación de escenarios para categorías representativas. (Elaboración propia)</i>	60
<i>Figura 40. Factores de ponderación para los análisis con IMDA 275,2750 y 7500 respectivamente</i>	62
<i>Figura 41. Resultados de los análisis con IMDA 275,2750 y 7500 respectivamente</i>	63



ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ACV	<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>
ADTT	<i>Average Daily Truck Traffic (Tráfico diario promedio de camiones)</i>
CFCs	<i>Clorofluorocarbonos</i>
CTU	<i>Unidad Comparativa de Toxicidad</i>
DIGESA	<i>Dirección General de Salud Ambiental</i>
ECA	<i>Estándares de Calidad Ambiental</i>
ELCD	<i>European Life Cycle Database (Base de datos europea para ciclo de vida)</i>
EPA	<i>Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos</i>
EVP	<i>Establecimientos de venta al público</i>
FICEM	<i>Federación Interamericana del Concreto</i>
HCFCs	<i>Hidroclorofluorocarbonos</i>
ICV	<i>Inventario de Ciclo de Vida</i>
MEM	<i>Ministerio de Energía y Minas</i>
MTC	<i>Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú</i>
OMS	<i>Organización Mundial de la Salud</i>
SETAC	<i>Sociedad de toxicología ambiental y química</i>
SINAC	<i>Sistema Nacional de Carreteras</i>
UNEP	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente</i>
TRACI	<i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts (Herramienta para la reducción y evaluación de químicos y otros impactos ambientales)</i>
RNE	<i>Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú</i>

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Identificación y descripción del problema

En el año 2016 el Sistema Nacional de Carreteras (SINAC) registro una longitud total de 9 449.7 km en el departamento de Arequipa, de los cuales el 65.35% corresponde a la red vial vecinal. El mismo año se movilizaron en el país 83.3 millones de pasajeros, 21.4 % tuvo como destino departamentos en la zona sur y durante el último quinquenio el parque automotor solo en la ciudad se incrementó por encima de los 200 mil vehículos, casi el doble del existente en el 2009, 98 mil vehículos. Además, solo en el 2017 se registraron 21 836 primeras inscripciones de vehículos en el Registro de Propiedad Vehicular según Sunarp. (Sunarp, 2017)

Por otra parte, con una inversión de 6 178 millones de soles en Provias Nacional y Descentralizado (MTC, 2016), es notorio que la red vial juega un papel importante en el desarrollo económico del país, permitiendo satisfacer las necesidades básicas de educación, trabajo, alimentación y salud de la población. Arequipa tuvo un crecimiento de 26,3% en el Producto Bruto Interno en el 2016 cifra mayor respecto al crecimiento nacional (3,9%) (INEI, 2016), siendo una ciudad que necesita medios para crecer organizadamente.

En este departamento, la construcción de los 7000 km de infraestructura vial faltante implicará impactos ambientales derivados, entre otros, del consumo de materiales de construcción. Por ejemplo, en Perú el consumo interno de cemento se duplicó hasta llegara a más de 10 millones de toneladas en el 2012, al igual que la venta interna de asfalto, que alcanzó 1 millón 315 mil barriles (INEI, 2012). Para América Latina, se estima que se emiten hasta 957 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producida (FICEM, n.d.), y se gasta alrededor de 6 MJ por kg de asfalto producido (Santero, Masanet, & Horvath, 2011). Además, la contaminación ambiental es un asunto que cobra mayor importancia en nuestro país, el 2014 el Perú emitió 61.745 kt (kilotón) de CO₂, duplicando la cantidad emitida en el 2006 (Banco Mundial, 2014) y Arequipa tenía una concentración de material particulado PM₁₀ de 74,1 ug/m³ en el 2012, cuando el limite diario establecido por la OMS es de 50 ug/m³ (Concepcion, 2014).

De aquí se desprende una gran oportunidad para mejorar el desempeño ambiental de la red vial urbana en la ciudad de Arequipa, por lo que en este estudio se busca aplicar la herramienta de gestión ambiental denominada Análisis de Ciclo de Vida que cuantifica y compara los impactos ambientales a lo largo de la vida útil de los pavimentos urbanos típicos en la región (pavimentos asfálticos y pavimentos de adoquines articulados de concreto) para definir cuál es el método más eficiente en términos de sus impactos medioambientales, permitiendo luego que las autoridades competentes tomen decisiones acertadas e informadas en materia ambiental.

Esta metodología brinda una perspectiva global de los sistemas que se revisarán, por el contrario, si solo se tomara en cuenta aspectos específicos, como los impactos generados por el consumo de materiales de construcción, no se reflejaría el impacto real que implica la infraestructura vial en el país.

1.1.2. Enunciado del Problema

En Arequipa no existe ningún estudio que determine y compare el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de los pavimentos urbanos típicos (pavimentos asfálticos y pavimentos de adoquines articulados de concreto), por lo que no se sabe a ciencia cierta, con indicadores cuantitativos claros, cual pavimento tiene un mejor desempeño ambiental.

Se utilizará la metodología ISO 14040 – Análisis de Ciclo de Vida y el software OpenLCA 1.7.0 (Greendelta, 2016) para comparar dichos pavimentos a través de la metodología TRACI 2.1 (EPA, 2014), que evalúa los siguientes indicadores: agotamiento del ozono estratosférico, potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, formación de smog y criterios de salud humana.

El estudio se llevará a cabo en el distrito de Tiabaya, que será aplicable a los pavimentos urbanos típicos de la ciudad de Arequipa.

1.1.3. Tipo de Investigación

La presente investigación es de carácter (1) Cuantitativo, se espera obtener el impacto ambiental de los sistemas analizados en términos de magnitudes numéricas aplicada, a través de los indicadores propuestos. (2) Aplicada, pues se tiene como propósito obtener conocimiento que permita mejorar los estándares actuales de calidad de vida de la ciudadanía. (3) Documental, puesto salvo algunas observaciones, la información se obtendrá de la biografía existente, la información del medio brindada a través de las autoridades competentes y el uso de base de datos.

1.1.4. Nivel de Investigación

Esta investigación es de nivel correlacional, evalúan la relación que hay entre dos o más variables en determinado contexto, en este caso el uso de recursos en las diferentes etapas del ciclo de vida de dos tipos de pavimentos con las cargas ambientales producidas por esta actividad.

Este tipo de investigación permite relacionar varios conceptos en situaciones en las que no es posible el control experimental, es decir en situaciones de observación natural y extracción de datos de los sistemas distinguidos. En este caso en particular, se sintetizará toda la información recogida en dos impactos ambientales, potencial de consumo de energía primaria y potencial de calentamiento global.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1. Objetivos Generales

Cuantificar y evaluar comparativamente los impactos ambientales en el ciclo de vida de pavimentos flexibles y con adoquines de concreto en el área urbana de la ciudad de Arequipa, Perú, considerando la Metodología ISO 14040.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar, cuantificar y comparar los indicadores ambientales: agotamiento del ozono estratosférico, acidificación, eutrofización, criterio de salud humana, potencial de calentamiento global y agotamiento de los recursos de los sistemas de pavimentación urbana típicos a lo largo de su ciclo de vida a través del software OpenLCA 1.7.0 y la base de datos EcoInvent V3.
- Determinar que etapas del ciclo de vida de cada pavimento presentan mayor impacto ambiental, y por ende mayor posibilidad de mejora.
- Evaluar comparativamente los impactos obtenidos entre ambos pavimentos, para determinar cuál es la mejor opción desde una perspectiva ambiental.

1.3. HIPÓTESIS

Tomando como base el estándar ISO 14040 e 14044, el pavimento urbano de adoquines articulados, bajo las mismas condiciones de temperatura, suelo de fundación y características de uso, implica menores cargas ambientales que el pavimento urbano asfáltico comúnmente usados en vías locales y colectoras en el distrito de Tiabaya, Arequipa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANALISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología regida por los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO), con las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que en adelante serán conocidas como ISO 14040 e ISO 14044.

Esta herramienta nos permite evaluar y cuantificar todos los impactos ambientales asociados a un producto o actividad, con el fin de identificar alternativas de mejora a lo largo de su ciclo de vida, permitiendo una toma de decisiones acertadas en su diseño, basadas en indicadores relevantes y confiables de desempeño ambiental. (ISO 14040, 2006)

El enfoque de ciclo de vida, también llamado “de cuna a tumba” (“from cradle to grave”), consiste en el análisis de cada paso en la vida de un producto, incluyendo la adquisición de materias primas, procesamiento, fabricación, uso y disposición final de todos los residuos. (Keoleian, G.A., and Menerey, 1993). Este análisis se realiza mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando (Estrella Suárez & González Vázquez, 2014).

A continuación, se dará una breve recapitulación del desarrollo del Análisis de ciclo de vida, conceptos básicos de esta metodología.

2.1.1. Historia del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La crisis energética que vivió Estado Unidos en 1973 ayudo las empresas y los particulares a tomar conciencia sobre el ahorro energético. Una de las consecuencias más notables fue el desarrollo de los análisis a los sistemas de individual. (Ambiente, 2001) producción, un detallado sistema para analizar la energía necesaria que se requiere para fabricar un producto

En 1959 se usó por primera vez el término “Análisis de Ciclo de Vida” en un reporte de la Comisión de Investigación y Desarrollo de las Fuerzas Armadas de EE.UU. (RAND Corporation), aunque el enfoque de este informe fue el costo de los sistemas armamentísticos, desde la compra de armamento, el desarrollo del sistema hasta los gastos al final de las operaciones. El Análisis de ciclo de vida aún no estaba referido a los impactos ambientales, pero se perfilaba como una herramienta para mejorar el manejo de presupuestos, dando una visión global del sistema analizado. (Curran, 2012)

La primera aparición del ACV con el enfoque ambiental que se tiene en la actualidad fue en un estudio realizado por Coca-Cola en 1969 para cuantificar los efectos ambientales desde la “cuna hasta la tumba” de los envases de gaseosas. Más que reducir emisiones o gasto energético, el estudio se enfocaba en reducir los residuos sólidos. Mientras tanto en Reino Unido, el “Manual para el análisis de Energía Industrial” fue publicado en 1979 por Boustead y Hancock.

La Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) realizó dos talleres de ACV durante 1992. El primero fue sobre la evaluación del impacto del ciclo de vida y el segundo se centró en la calidad de los datos. Como resultado de dichos talleres se publicó la “Guía para la evaluación del ciclo de vida: Un código de práctica”. De igual manera El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) publicó “Evaluación del ciclo de vida: qué es y cómo hacerlo” y la Agencia Europea del Medio Ambiente publicó “Evaluación del ciclo de vida: una guía de enfoques, experiencias y fuentes de información”. (Khasreen, Banfill, & Menzies, 2009)

Hubo muchas iniciativas para estandarizar la metodología de evaluación del ciclo de vida; la Asociación Canadiense de Estándares publicó la primera guía nacional de ACV Z-760 en 1994, para proporcionar información detallada sobre dicha metodología. Pero los estándares más reconocidos fueron los publicados por la Organización Internacional de Normalización ISO en la década de los 90.(Khasreen et al., 2009)

En el 2002 se lanzó la “Iniciativa Global de Ciclo de Vida” en la que la UNEP y la SETAC unieron fuerzas. Esta iniciativa, actualmente en su tercera fase, busca promover el pensamiento del ciclo de vida y su práctica eficiente. Asimismo, responde al plan de 10 años para el desarrollo sostenible de acuerdo a los lineamientos del “World Summit on Sustainable Development” (WSSD) y al plan de Johannesburgo 2002. (Cáceres Cebrecos, 2016)

Aunque se ha avanzado mucho en la aplicación y estandarización del ACV, en nuestro país hay muy pocas iniciativas para la difusión de este método, siendo una de las primeras la Red Peruana de Ciclo de Vida, fundada en 2005 como parte de la Iniciativa de Ciclo de Vida creada por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Por otro lado, hay empresas privadas como SGS que brindan consultoría y llevan a cabo Análisis de Ciclo de vida en el Perú con fines mayormente comerciales.

2.1.2. Análisis de Ciclo de Vida en pavimentos

Existe una gran oportunidad de reducción de impactos ambientales en los análisis de ciclo de vida de pavimentos, considerando que la red mundial de carreteras traslada más de nueve trillones de ton-km y transporta pasajeros por más de quince trillones de kilómetros al año. (Santero et al., 2011). Lograr una infraestructura vial sustentable es posible, a través de un diseño de alto desempeño, la reducción de costos y la reducción de impactos ambientales. Se debe equilibrar estos tres factores para presentar una opción sustentable en todos los sentidos, que se pueda llevar a la práctica (Gregory, 2017).

El objetivo de un ACV de pavimentos es generar información para que los actores implicados, autoridades y diseñadores, puedan reducir las cargas ambientales de esta actividad. El ciclo de vida de un pavimento está dividido en 5 fase: Materias primas y producción, construcción, uso, mantenimiento y fin de vida, los que pueden ser agrupadas en tres procesos globales que son pre-uso, uso y fin de vida.

El desempeño ambiental de un pavimento puede ser evaluado de distintas maneras, siendo las cargas ambientales determinantes en un pavimento asfáltico las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, polvo y consumo

energético. Estos impactos también son determinantes en el caso de un pavimento de concreto. (Häkkinen & Mäkelä, 1996)

Los primeros ACV para pavimentos fueron publicados a mitad de los años noventa, y se difundieron a través de varios medios como organizaciones industriales y gubernamentales, principalmente en Finlandia, Estados Unidos y Canadá. En teoría un estudio de este tipo debe incluir todas las fases del ciclo de vida de un pavimento, pero en la práctica ha resultado casi imposible debido a la información disponible, la falta de tiempo y las restricciones de conocimiento.

Häkkinen, T., & Mäkelä, K. realizaron una de las primeras investigaciones en 1996 para el Centro de Investigación Técnica de Finlandia. La unidad funcional propuesta fue 1km de pavimento que soportaba 20 000 vehículos por día, y el tiempo de análisis fue de 50 años. El estudio comparaba un pavimento de concreto compuesto por una base de roca de 1.9 a 2.5 metros, una capa de concreto asfáltico de 120 mm a modo de base granular y concreto de 220 mm de alta resistencia (80 MPa) y un pavimento flexible compuesto por una base de roca de 1.9 metros, dos capas de base granular de 190 mm en total y una capa de asfalto de 50 mm.

Una de las conclusiones más resaltantes fue que, para el modelo estudiado, si se lograba reducir 0.1-0.5% el consumo de combustible debido a las propiedades del pavimento rígido se lograría un “ahorro” de emisiones del mismo orden de magnitud que el total de las emisiones del resto de fases del ciclo de vida en este tipo de calzada.

Por otra parte, en China, Bin Yu realizó un ACV comparando tres sistemas de superposición para reparar un pavimento de concreto antiguo, superposición de concreto, superposición de pavimento asfáltico en caliente y asiento y revestimiento (Crack, Seat and Overlay). El caso conduce a las siguientes conclusiones. Es razonable esperar menos cargas ambientales del hormigón de cemento Portland y de las opciones de grietas, asientos y superposición en comparación con el pavimento asfáltico en caliente, aunque los resultados tienen un alto grado de incertidumbre.

El material, la congestión y, en particular, los factores de uso contribuyen en gran medida al consumo de energía y la contaminación del aire. El consumo de energía relacionado con el tráfico y los gases de efecto invernadero son sensibles al crecimiento del tráfico y la mejora de la economía de combustible.

Las limitaciones presentadas en esta investigación serán muy parecidas a las estudiadas por Santero et al. En su revisión hace referencia a la falta de datos confiables y actualizados para trazar el modelo de ciclo de vida. En el Perú, a diferencia de otros países Latinoamericanos no existen una base de datos provista por los principales proveedores de materias primas y las empresas constructoras, tampoco existen estadísticas actualizadas brindadas por las organizaciones gubernamentales. Lo que se planteará es la adaptación de las bases de datos realizadas en otros países, llevándolas en lo posible a un contexto similar al de los modelos seleccionados en este ACV. Tampoco existen metodologías de evaluación de impacto desarrolladas específicamente para el contexto peruano, por lo que se utilizara la metodología TRACI, propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

También es cierto que, debido a la naturaleza del estudio, los resultados que se prevén obtener, no serán directamente aplicables a otras ciudades del país por las diferencias en condiciones ambientales y de entorno. La información generada en este estudio deberá ser sometida a una revisión exhaustiva antes de poder sacar conclusiones aplicables a otros casos.

En el Perú, la legislación ambiental se regula a través de los indicadores de calidad ambiental (ECA) que miden la concentración de elementos en el aire agua. No son exigibles legalmente, pero funcionan como parámetros para las políticas ambientales, permitiendo establecer niveles aceptables de emisiones. Por ejemplo, los ECAS determinan que concentración de CO₂ debe existir en el ambiente, sin importar que actividad lo produzca. (Minem, 2001)

2.1.3. Fases del Ciclo de Vida

Según la ISO: 14040, hay cuatro fases en un estudio de ACV: la fase de definición de objetivo y alcance, el análisis de inventario fase, la fase de evaluación de impacto y la fase de interpretación. (ISO 14040, 2006), que se revisarán brevemente a continuación.

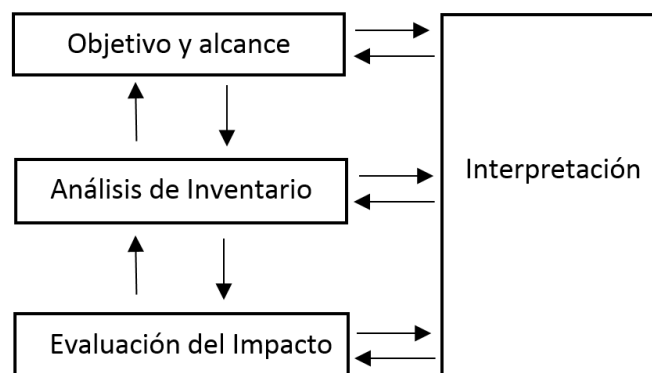


Figura 1. Relación entre las fases del ACV. Fuente. Adaptado de la norma ISO 14040:2006

Objetivo y alcance del estudio

El objetivo de un ACV incluye la aplicación del estudio, las razones para llevarlo a cabo y para que se obtendrán los resultados. También se debe tomar en cuenta quienes serán los receptores finales de los resultados, para lograr un mejor entendimiento de la investigación.

Por otro lado, en el alcance del estudio se especificará la unidad funcional, que define lo que se está estudiando. Acorde a la norma ISO 14040 la unidad funcional es “La performance cuantificada de un sistema de producto, para ser usada como unidad de referencia”. Todos los análisis posteriores, son relativos a esa unidad funcional. (ISO 14040, 2006).

Los flujos de referencia es la medida de los insumos y emisiones de un proceso parte del sistema estudiado que se requiere para cumplir la función relacionada a la unidad funcional.

Además, se detallará los sistemas estudiados, incluidos los límites de estos, las categorías de impacto elegidas y la metodología de evaluación de los impactos. También es importante mencionar las suposiciones y limitaciones utilizadas en el estudio.

Inventario de Ciclo de Vida

El análisis de inventario implica la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar los insumos relevantes y salidas de un sistema de producto.

El sistema producto es el conjunto de procesos unitarios que desempeñan una o varias funciones claramente definidas, no pudiendo ser definido solo en términos del producto final. Este sistema está dividido en procesos unitarios que se interrelacionan por flujos y desechos, y a su vez se relacionan con el ambiente mediante flujos elementales (p.e. CO₂)

Los flujos se pueden clasificar en títulos principales, que se presentan a continuación.

- Insumos energéticos, insumos de materias primas, insumos auxiliares, otros insumos físicos;
- Productos, subproductos y residuos;
- Emisiones al aire, descargas al agua y al suelo. (ISO 14040, 2006)

Son necesarios cálculos de cuantificación para los flujos asociados al sistema, para cada proceso unitario y relacionado a la unidad funcional definida anteriormente. El resultado de la etapa de inventario es el conjunto de flujos elementales, que servirá de input para la evaluación del impacto.

Evaluación del Impacto

La fase de evaluación del impacto implica evaluar el significado de los impactos ambientales potenciales. Este proceso significa asociar los datos del inventario de ciclo de vida con las categorías de impacto y los indicadores.

Es importante mencionar que las elecciones en el modelo y evaluación pueden ser subjetivas, por lo que se debe mostrar claramente las suposiciones realizadas.

Según las especificaciones de la norma ISO 14044:2016, la evaluación del impacto tiene los siguientes elementos obligatorios:

- Selección de categorías de impacto, indicadores y modelos de caracterización. Los factores de caracterización, derivados de los modelos mencionados anteriormente, tienen por función convertir los resultados del análisis de inventario a la unidad común del indicador de categoría.

- Asignación de los resultados del análisis de inventario a las categorías de impacto.
- Cálculo de los resultados del indicador de categoría. (ISO 14044, 2006)

$$\text{Cantidad de recursos y emisiones.} \times \text{Factor de Caracterización} = \text{Impacto ambiental dentro de una categoría}$$

La etapa de evaluación del impacto solo toma en cuenta los problemas ambientales dentro del objetivo y alcance del proyecto, por lo que la evaluación del impacto no es una evaluación completa de todos los impactos del sistema.

Interpretación

La interpretación en un ACV comprende la identificación de los problemas más resaltantes resultados de las fases descritas anteriormente, evaluación de la consistencia y complejidad de los resultados y las conclusiones, limitaciones y recomendaciones para el sistema estudiado.

Los resultados obtenidos deben ser interpretados en relación con el objetivo y el alcance del estudio, con la unidad funcional seleccionada y los límites del sistema.

2.2. PAVIMENTOS URBANOS

Un pavimento es una estructura compuesta por capas que apoya en toda su superficie sobre el terreno preparado para soportarla durante un lapso denominado Período de Diseño y dentro de un rango de Serviciabilidad (RNE CE.010, 2010). La función de un pavimento es la de proveer una superficie de rodamiento adecuada al tránsito y distribuir las cargas aplicadas por el mismo, sin que se sobrepasen las tensiones admisibles de las distintas capas del pavimento y de los suelos de fundación.

2.2.1. Pavimentos flexibles con carpeta asfáltica en frío

Según la Norma Técnica Peruana, es aquel pavimento con superficie asfáltica, compuesto por una o más capas de mezclas asfálticas que pueden o no apoyarse sobre una base y una sub base granulares (RNE CE.010, 2010).

Los pavimentos con carpeta asfáltica en frío o mezcla asfáltica en frío se caracterizan porque la unión de los agregados se logra a una temperatura de 60°C; una temperatura mucho menor a los 140°C necesarios en una mezcla en caliente típica. En este tipo de mezcla el cemento asfáltico es fluidificado con el uso de distintos solventes del petróleo, que hacen que varíe la velocidad de curado. Se identifican tres tipos de asfaltos líquidos RC (asfaltos de curado rápido, solvente gasolina), MC (asfaltos de curado medio, solvente queroseno) y SC (asfaltos de curado lento, solvente aceites pesados de baja volatilidad).

El solvente es por lo general el 25% del volumen de la mezcla, aunque no forma parte de la mezcla final, puesto que se evapora produciendo gran contaminación ambiental. Adicionalmente la manipulación de las sustancias ligantes conlleva un riesgo alto debido a su volatilidad y riesgo de inflamación. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015). En la ciudad de Arequipa aún se utiliza típicamente el asfalto RC en mezclas asfálticas en frío, a pesar de ya no formar parte del Manual de Carreteras del Perú debido al gran volumen de emisiones que produce.

Procedimiento constructivo de un pavimento flexible en frío.

Una vez la sub rasante se encuentre compactada se procederá al extendido y colocación de la sub base granular, capa no rígida que tiene como función disminuir las deformaciones que el cambio en el contenido de agua o de temperatura pueden provocar en la sub rasante y que afectan a las capas superiores. (Montejo Fonseca, 2002)

Luego de que el material haya sido extendido, se debe compactar desde los bordes hasta el eje de la vía teniendo en cuenta el contenido óptimo de humedad para lograr la densidad necesaria medido en porcentaje de la densidad máxima obtenida en el ensayo de Proctor Modificado. De la misma manera se debe proceder a la colocación de la capa base, hasta obtener una superficie lisa y sin irregularidades que servirá de soporte a la carpeta asfáltica.

Un proceso resaltante en la construcción de este tipo de pavimentos es el riego de imprimación consistente en la aplicación de una capa de ligante bituminoso que se realiza para lograr adherencia entre el material de base y la carpeta superior, impermeabilizar las capas inferiores y traba las partículas sueltas. Por lo general se usa un asfalto líquido del tipo MC-70 o MC-30 y la cantidad aplicada debe ser de 0.3 a 0.6 galones (1.1 a 2.3 L) por metro cuadrado, con una temperatura de aplicación de 40 a 50°C. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015). En el Perú la imprimación se realiza con MC-30.

Según el expediente técnico del proyecto analizado, otras consideraciones importantes para una correcta aplicación es que se imprimirá siempre y cuando la temperatura ambiente sea mayor a los 5°C sin riesgo de lluvia sobre una base limpia y seca previamente barrida, así mismo no se permitirá el paso de tránsito sobre las superficies imprimadas hasta 24 horas después.

La aplicación del riego de imprimación, deberá estar coordinada con la puesta en obra de la capa asfáltica, de manera que el ligante no haya perdido su efectividad como elemento de unión. Finalmente se realiza la colocación de la carpeta asfáltica, compuesta de agregados minerales con la gradación adecuada, filler y material bituminoso, RC250 para el pavimento asfáltico estudiado. La mezcla se realizará en planta y será transportada a pie de obra, donde se procederá a su colocación por medio de pavimentadoras. Finalmente, la mezcla asfáltica es compactada por rodillos de 8 toneladas como mínimo hasta obtener una superficie lisa que concuerde con los requerimientos del perfil típico de la vía.

2.2.2. Pavimentos articulados de concreto

Los pavimentos articulados son aquellos formados por adoquines articulados soportados por una cama de arena y una sub-rasante que soporte las cargas producidas por el tránsito. (NTP CE.010, 2010) Para que el sistema de transmisión de cargas funcione adecuadamente, el pavimento debe estar confinado en el plano horizontal mediante topes y con un adecuado sello de arena.

Según lo mencionado por Montejó, las investigaciones desarrolladas en la Cement and Concrete Association (Reino Unido) han indicado que un pavimento de adoquines se comporta de manera similar a uno flexible. (Montejó Fonseca, 2002). Adicionalmente, el pavimento articulado tiene bajos costos de instalación y mantenimiento, así como un proceso constructivo sencillo que lo convierte en una buena opción para las vías urbanas que no estarán expuestas a niveles de tráfico elevados.

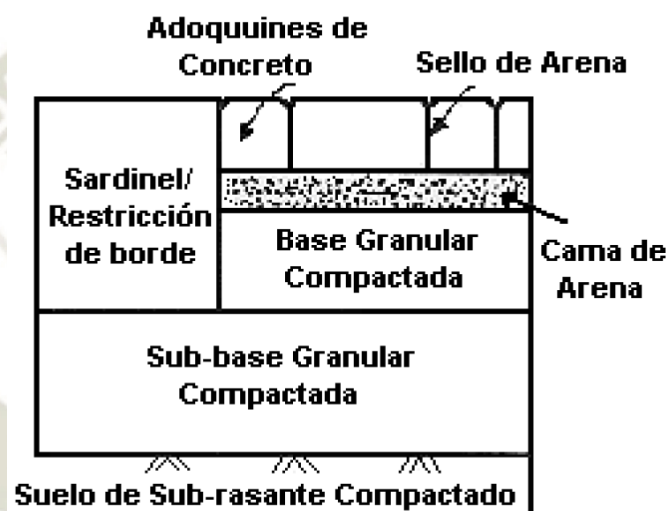


Figura 2 Sección transversal típica de los pavimentos articulados. Extraído de la norma NTP CE.010

Las limitaciones en el uso de pavimento articulado como sistema de pavimentación no están claras, pero a continuación se muestran los aspectos más relevantes considerados en la normativa peruana. La Norma Técnica Peruana para Pavimentos Urbanos indica que este tipo de pavimentación es solo recomendable hasta en calles colectoras, que soportan como máximo 8000 vehículos diarios. (NPT CE 0.10, 2010). Este volumen de tránsito equivaldría a 5×10^6 ejes equivalentes.

Por otra parte, la Norma Técnica Peruana de adoquines no establece alguna restricción para su uso, se limita a clasificar las bloquetas de acuerdo al tráfico que soportan en Tipo I para tránsito peatonal, tipo II para tránsito vehicular ligero y tipo III para tránsito vehicular pesado, que es equivalente a más de 5×10^6 ejes sencillos de 8.2 toneladas acumulados en la edad de diseño (NTP 399611, 2010).

Por último, el Manual de Carreteras en su sección de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos limita el uso de pavimentos de adoquines de concreto hasta 15 000 000 repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante un periodo de diseño de 20 años. (MTC,2013)

Procedimiento constructivo de un pavimento articulado.

El procedimiento constructivo detallado a continuación es el que se considerara para el modelo de pavimento articulado y fue obtenido de las especificaciones técnicas del proyecto, que es el que generalmente se aplica en nuestro medio. El primer paso es la preparación de la sub-rasante, escarificando 5 cm por debajo de la cota indicada para retirar todo el agregado con diámetros mayores a 3". Luego de batir y compactar la superficie del terreno natural se procederá a colocar la base granular de manera similar a la colocación en el caso de pavimentos flexibles.

Sobre esta base se extenderá la cama de arena, que debe cumplir con la granulometría reglamentaria (NTP 400.037, 2014) y no poseer partículas orgánicas, finos plásticos y otras sustancias perjudiciales. El espesor recomendado para esta capa es de 3 a 5 centímetros y no debe estar expuesta a lluvias o flujos de agua previa al articulado.

El transporte de los bloques de cemento al pie de obra debe realizarse de manera ordenada y evitando en lo posible, la alteración de la calidad de los mismos. La colocación de los adoquines sobre la cama de arena se realizará de manera que no queden juntas mayores a 3 mm entre ellos y siguiendo un patrón uniforme, "espina de pescado", para evitar el desplazamiento de las unidades.

Se realizará una primera compactación del articulado, dejando una franja de un metro de ancho entre el borde libre y la zona a compactar. Después se aplicará una capa de arena de 3 mm de espesor que servirá para el sellado de juntas, dicho agregado debe estar seco para facilitar su penetración y debe quedar un remanente sobre la superficie por un lapso de mínimo dos semanas para que el tránsito de vehículos y peatones ayude a la acomodación de las partículas

Es importante recalcar que todos los bordes del pavimento deben estar rodeados por sardineles de confinamiento o límite para el correcto funcionamiento estructural de la superficie de rodadura. Dichos sardineles serán de concreto simple.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS VIAS URBANAS

Según la Norma Técnica Peruana, las vías urbanas se pueden clasificar de seis formas, esta investigación se centrará en dos tipos de ellas, las vías residenciales y las vías colectoras. (NTP CE.010, 2010)

Calles residenciales o locales

Son aquellas que soportan tráfico de 200 a 1000 vpd (vehículos por día) más un tráfico diario promedio de camiones (ADTT) de 10 a 50 unidades. Las cargas máximas para estas calles son de 98 kN para ejes simples y 160 kN para ejes tándem.

Calles colectoras

Pueden servir como ruta de buses y recolectan el tráfico de las vías residenciales, soportan tráfico de 1000 a 8000 vpd (vehículos por día) más un tráfico diario promedio de camiones (ADTT) de 50 a 500 unidades. Las cargas máximas para estas calles son de 116 kN para ejes simples y 196 kN para ejes tándem.

Además, de acuerdo al Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, la gran mayoría de vías urbanas, residenciales o colectoras, son clasificadas como carreteras de segunda clase, con dos calzadas de 3.30 m de ancho como mínimo, superficies de rodadura pavimentada y con dispositivos de seguridad vial. (MTC, 2018)

2.4 OPERACIÓN DE VIAS URBANAS

Para el análisis de los impactos de la operación de ambos modelos se consideraron los siguientes factores, el albedo de las superficies y el gasto de combustible debido a la rugosidad de los pavimentos. Existen otros factores, como el efecto de isla de calor, que no aplicaban al contexto de las vías analizadas.

2.4.1. Albedo

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. No tiene unidades de medida, por lo que se utiliza un valor que varía de 0 a 1 donde las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates.

Es importante considerar este factor en el ACV de un pavimento puesto que dependiendo del grado de reflexión de la superficie esta absorberá la radiación que ingresa a la atmósfera, provocando calentamiento. De lo anterior se desprende que los pavimentos claros reflejan mayor cantidad de rayos, ayudando al enfriamiento del medio. Este fenómeno se conoce como forzamiento radiativo y se refiere a los cambios de radiación en un sistema climático.

Para el cálculo se utilizó la metodología del CSHub (MIT) que se basa a su vez en los estudios de Alkabari et al, que concluyen que por un incremento de 0.1 en el albedo en la superficie del pavimento se evita la producción de 2.55 kg CO₂-eq/m² durante el periodo de vida. (Akbari, Damon Matthews, & Seto, 2012). Los valores de albedo para pavimentos flexibles varían de 0.05 a 0.2 y de 0.25 a 0.4 para pavimentos rígidos. La ecuación para el cálculo del impacto positivo del albedo es la siguiente. (Swei et al., 2014)

$$m_{CO_2,RF} = \frac{\Delta\alpha}{0.01} \times A \times Ef_{RF} \quad \dots \text{ecuación 1}$$

Donde:

m_{CO_2} = Reducción de emisiones, en kg de CO₂ equivalente

$\Delta\alpha$ = Variación de albedo

A = Superficie analizada, en m²

Ef_{RF} = Disminución de las emisiones por variación de albedo, 2.55 kg CO₂-eq/m²

2.4.2. Índice de rugosidad internacional (IRI)

La rugosidad del pavimento se mide con el índice de rugosidad internacional (IRI) y varía de 0 a 20 m/km. Es uno de los parámetros más usados para evaluar el estado de una vía y el confort que brinda al ser usada. Matemáticamente, el índice de rugosidad se define como la acumulación de desplazamientos verticales en valor absoluto, de la masa de un vehículo con respecto a la masa asociada a la suspensión de un modelo de vehículo, entre la distancia recorrida sobre un camino que se produce por los movimientos al vehículo. Las unidades del IRI serán de longitud entre longitud, siendo las más usuales in/mi o m/km para el sistema métrico.

La norma NTP CE.010 no brinda límites para la rugosidad de los pavimentos urbanos, sin embargo, el Manual de Carreteras del MTC, sección de Suelos y Pavimentos, indica que la rugosidad máxima para pavimentos con un IMDA entre 201 y 400 es de 4.5 m/km durante el periodo de servicio.

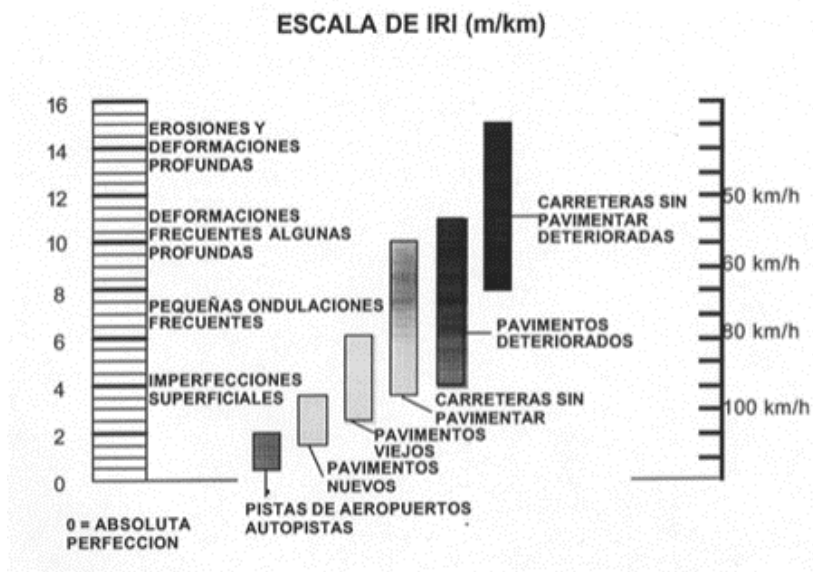


Figura 3 Valores de rugosidad para distintos tipos de pavimentos. (Sayers Y Karamihas,1998)

2.4.3. Gasto de combustible debido a rugosidad

Se ha realizado varios estudios acerca de la interacción pavimento vehículo y una conclusión determinante para este estudio se refiere al gasto de combustible debido a la rugosidad de la superficie de rodadura. Esta relación ha sido estudiada por Zaabar and Chatti, que obtuvieron que el porcentaje de combustible usado incrementaba al aumentar la rugosidad de la vía.

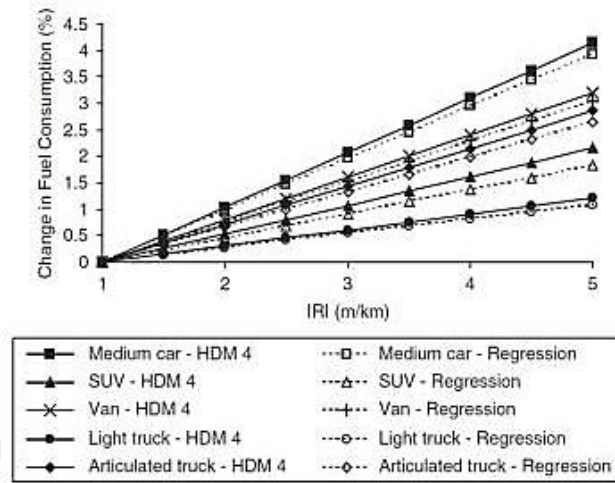


Figura 4. Variación en el consumo de combustible debido a rugosidad. (Zaabar, I., Chatti, K.2010.)

Se utilizaron las ecuaciones del Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG, 2008) para hallar el IRI final de las vías analizadas, tomando como IRI inicial el valor de 1.89 m/km que se obtuvo en la medición de vías recién rehabilitadas en la ciudad de Lima. (Vaca, 2015).

En el caso de pavimentos de asfalto, la ecuación utilizada es la siguiente :

$$IRI = IRI_0 + 0.015(SF) + 0.400(FC_{Total}) + 40.0(RD) \dots \text{ecuación 2}$$

Donde:

IRI_0 = IRI inicial después de construcción, in/mi.

SF = Factor de zona (De acuerdo a la ecuación siguiente)

FC_{total} = Área de rotura por fatiga en pavimento asfáltico, %

RD = Profundidad de ahueamiento promedio, in. Se considera un valor menor de 25mm para ahueamiento bajo, menor a 50mm para uno medio e igual a 50mm para uno alto.

$$SF = Edad[0.02003(PI + 1) + 0.007947(Precip + 1) + 0.000636(FI + 1)]$$

Donde:

Edad = Edad del pavimento, años.

PI = Índice de plasticidad del suelo.

FI = Índice anual de congelamiento, días °F.

Precip. = Precipitación promedio anual, in.

En el caso del índice de rugosidad del pavimento articulado se considerara los valores dados por el MTC en el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos en su sección 2, Suelos y Pavimentos, que brinda valores máximos de rugosidad durante el servicio según el IMDA de las vías.

TIPO DE CARRETERA	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO NUEVO IRI (M/KM)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO REFORZADO IRI (M/KM)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA DURANTE EL PERIODO DE SERVICIO IRI (M/KM)	OBSERVACIÓN
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 98%
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 85%

Tabla 1. Valores de Rugosidad Admisible IRI (m/km) según Tipo de Carretera. (Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2013)

2.5. LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS EN EL PERÚ

Los impactos ambientales esperados de la construcción y operación de las vías son en su mayoría consecuencia de la combustión de diésel o gasolina a lo largo de las etapas del ciclo de vida. A continuación, se hace una revisión del libro “La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al desarrollo del país” para mostrar un panorama global de la industria de los hidrocarburos en el país. (Tamayo, Jácome, Vázquez Arturo, & De la Cruz, 2015)

2.5.1. El Perú en el contexto global.

La importancia de este sector en la economía está dada por su relevancia en los principales indicadores económicos. Los hidrocarburos líquidos (petróleo y sus derivados y líquidos de gas natural, LGN) tienen un rol importante en las actividades económicas en el mundo, siendo el transporte la principal fuente de demanda (56%) seguida por el sector industrial que represento el 32% de la demanda.

Al ser el petróleo un bien determinante en la economía, los países no productores han establecido sistemas para garantizar el suministro de petróleo. El mecanismo usado por

la Agencia Internacional de Energía (IEA) es el de las existencias mínimas, que son cantidades mínimas de reservas de petróleo en cada país. Estas existencias se calculan como la cantidad neta importada en 90 días del año precedente.

Por su parte la legislación peruana obliga a los productores y distribuidores mayoristas a mantener existencias medias, equivalentes a 15 días de venta de los últimos 6 meses en stock, y mínimas, equivalentes a 5 días (Artículo N° 43 del D.S. N° 045-2001-EM). El Perú ha realizado grandes avances normativos para asegurar la seguridad del suministro en los últimos años con la promulgación de la Ley N° 29852, que crea el Sistema de Seguridad Energética (SISE) y el Fondo de Inclusión Social Energético (FISE).

Del total de reservas mundiales de petróleo el Perú cuenta con 1.4 miles de millones de barriles (MMMBLS) de reservas probadas, lo que significa el 0.1% de las reservas a nivel mundial. En cuanto a producción, en el 2014 se extrajeron de 89 millones de barriles por día (MMBPD) entre petróleo y gas natural, donde Perú represento el 0.1% de producción y consumió 0.23 MMBPD (0.2% del consumo mundial). En los países en vías de desarrollo se tienen menores PBI per cápita y un consumo de hidrocarburos per cápita bajo, opuesto a los países desarrollados como Estados Unidos. En el territorio nacional existen seis refinerías (dos privadas y cuatro públicas), y se tiene una capacidad de producción de 0.2 MMBPD que no llega a cubrir la demanda del país. Con la modernización de la refinería de Talara la capacidad se incrementaría en 30 MBPD, pero en el primer trimestre del 2015 el promedio diario fue de 59 000 barriles de crudo. Además, actualmente existen 42 lotes asignados a la exploración petrolera de los cuales y 24 están en etapa de explotación.

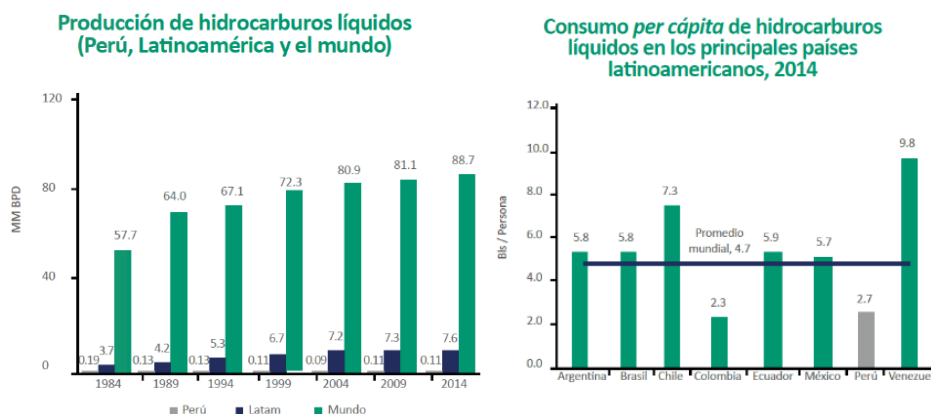


Figura 5. Indicadores de producción y consumo de combustibles. British Petroleum y MEM. Elaboración OEE-Osinergmin

El precio de los hidrocarburos en Perú depende del mercado intencional por ser un país importador de hidrocarburos derivados del petróleo. Este precio está constituido en un 40% por el precio neto de refinería, que depende de la tendencia de los precios internacionales y en la cual no se puede influir, ente un 20% y 30% representa los impuestos y el resto está compuesto por el valor agregado y el margen de ganancia de los agentes involucrados. No existe una regulación económica de los hidrocarburos

líquidos. Otro problema es el fenómeno de cohetes y plumas, los precios domésticos suben muy rápido cuando los precios internacionales se incrementan pero caen muy lentamente cuando se reducen, generando sobrecostos y malestar entre los usuarios que no pueden beneficiarse de las bajas. (Osinermin, 2015)

2.5.2. Características del mercado peruano.

En el mercado peruano el petróleo ha pasado de tener 63% de importancia en 1995 a 54% en el 2012 debido al ingreso del gas natural (GN). Según el Balance nacional de Energía 2012 del Ministerio de Energía y Minas (MEM), el transporte es el mayor consumidor de combustibles líquidos seguido por el sector industrial.

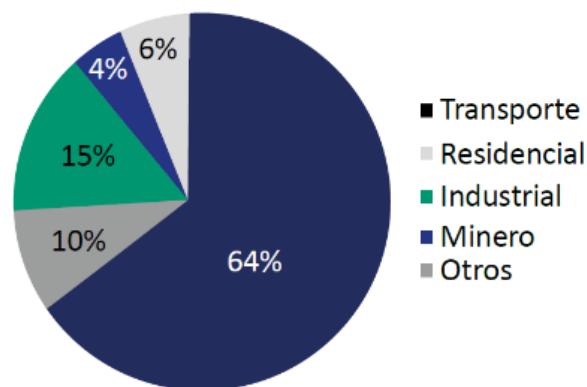


Figura 6. Consumo de combustibles por sectores económicos. 2012. (MEM. Elaboración OEE-Osinermin)

Las reservas probadas de hidrocarburos líquidos en el Perú totalizaron 1 410 Millones de Barriles de Petróleo Fiscalizado a Condiciones Estándar (MMSTB). De las cuales, el 48% corresponden a petróleo y 52% a LGN.

La oferta del crudo ha disminuido en el país de manera constante en el periodo 2000-2014, incrementando la importación de petróleo sin procesar. Si bien la modernización de Talara y la Pampilla permitirán una mayor capacidad de refinación y reducir niveles de contaminación ambiental se seguirá manteniendo la dependencia del mercado internacional, por lo que se debe diversificar la matriz energética teniendo en cuenta que la producción de gas natural es la única que satisface la demanda nacional.

Dentro de la demanda de las gasolinas y gasoholes, las de 84 y 90 octanos tienen el 80% de participación en el mercado, con una tasa de crecimiento de 8% anual en promedio durante el último quinquenio. Por otra parte, en el 2014 el diésel fue el combustible más usado a nivel nacional con 46% del total, siendo el de mayor importancia en transportes y minería.

En cuanto a la geografía de distribución de combustibles Arequipa, como parte de la zona sur del país se abastece de diésel por los terminales de Ilo y Mollendo principalmente y las plantas de ventas de Cusco y La Pampilla. La figura es similar en

el caso de gasolinas, teniendo como única diferencia el ingreso de la planta de ventas de Juliaca. Como se ha mencionado anteriormente el acceso a combustibles permite el acceso a distintos servicios, este factor es analizado mediante el índice de cobertura de (Establecimientos de venta al público) EVPs, que mide la cantidad de EVPs por cada 10 000 vehículos residenciales. En el caso de Arequipa, el índice es alto, pues los EVPs son numerosos y con mayor capacidad por vehículo respecto al promedio nacional.

2.5.3. Petróleo y sus derivados.

El petróleo es una mezcla de carbono e hidrogeno en estado líquido que se encuentra mezclado en depósitos subterráneos con otros elementos, por lo que debe ser procesado para su comercialización. Existen dos partes en la cadena de valor de los hidrocarburos, el upstream o río arriba que incluye la exploración de nuevas reservas y la explotación y el downstream o río abajo que abarca la refinación o fraccionamiento del hidrocarburo y su transformación en los diferentes combustibles, el transporte y almacenamiento hasta la comercialización mayorista y minorista. Algunas veces el transporte de los hidrocarburos sin procesar se incluye en el upstream y otras se menciona como midstream o río medio.

Ya que el uso práctico del petróleo es mínimo la refinación es la actividad principal en esta industria, resultado de la cual se obtienen bienes como diésel o gasolinas. Este proceso consiste en aplicar calor al crudo de petróleo para separarlo según su densidad (Livianos, pesados o extra pesados), para luego mezclarlo con otros componentes para su comercialización.

La gasolina es un derivado liviano del petróleo y es usado en motores de combustión interna con encendido por chispa. La medida de su calidad se encuentra en el octanaje, o resistencia a la ignición sin ayuda de una bujía, que permite una mejor respuesta, mayor potencia y eficiencia. El número de octano también evita las detonaciones y explosiones en motores con relaciones elevadas de compresión, produciéndose el “autoencendido” que reduce el rendimiento del motor y puede producir averías. Los problemas derivados de un combustible de menor calidad impactan en los costos de operación vehicular (COV), peor esta variable no se mide en el Perú, sin embargo se considera que a menor calidad mayor es el consumo de unidades de combustible en un mismo trayecto.

En el Perú las gasolinas sin plomo se comenzaron a comercializar en los noventa (D.S. N° 019-98-EM) y se prohibieron las que contenían plomo en el 2005. Además en otros países esta restringido el contenido de oxígeno en este combustible pues incrementa las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Respecto al diésel, la medida de calidad es el número de cetano que refleja el nivel de ignición del diésel y es el porcentaje de cetano en la mezcla con alfametilnaftaleno. El problema más agudo en relación con este combustible es el contenido de azufre.

Mediante el Cronograma de Reducción Progresiva del Contenido de Azufre en el Combustible Diésel N° 2 (D.S. N° 025-2005-EM) se dispuso que desde marzo del 2006 no se podría comercializar diésel con más de 2500 ppm (partes por millón) de azufre, y que a partir de 2010 se prohibiría la venta de diésel de más de 50 ppm.

La reducción de azufre disminuye las emisiones de dióxido de azufre y de materia particulado, reduciendo los efectos carcinógenos y tóxicos. Blumberg et al. (2003) citan resultados de estudios japoneses en los cuales una reducción en el contenido de azufre de 400 a 2 ppm en camiones disminuyó las emisiones de material particulado en un 50%, mientras que en Estados Unidos una reducción en el azufre de 368 a 54 ppm produjo una disminución de 14% en la masa de emisiones de particulados.



3. METODOLOGÍA

3.1. UTILIZACIÓN DE SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE ACV

3.1.1. OpenLCA 1.7.0

OpenLCA es el software utilizado para el desarrollo de esta aplicación, ha sido desarrollado desde el 2006 por GreenDelta, compañía alemana con más de 20 años de antigüedad dedicada al desarrollo de software, base de datos, métodos y consultoría en sostenibilidad (Noi, Citroth, & Srocka, 2017). Fue elegido por ser de uso libre, intuitivo y amigable con el usuario. Además, que es posible trabajar con varias bases de datos importantes como Ecoinvent V3, GaBi Database, USDA entre otras. Como la mayoría de softwares en el mercado, OpenLCA utiliza el enfoque de suma de procesos (Process sum).

Este programa permite modelar ciclos de vida para casi cualquier producto o actividad de dos maneras distintas, por procesos unitarios y por procesos de sistema. Ambos modelos tendrán los mismos resultados, pero en el primero se crean relaciones entre cada proceso que favorece el entendimiento final de los resultados obtenidos, mientras que en el proceso de sistema todos los inputs se consideran desde el comienzo y no se sabe con exactitud qué etapa o proceso es más relevante en el análisis.

En esta investigación se utilizó el método de procesos unitarios para las actividades creadas, pero cabe mencionar que los flujos de actividades precedentes como la producción de cemento son obtenidos de procesos de sistema realizados en investigaciones anteriores.

3.1.2. Método de Evaluación de Impactos TRACI 2.1

Una vez obtenido el inventario del ciclo de vida, es necesario elegir un método de evaluación de impactos que permitirá asignar y cuantificar las emisiones dentro de los potenciales impactos ambientales que podrían ocasionar. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno liberados por la combustión en vehículos ocasionan acidificación del aire, contribuyen a la formación de smog y tienen impactos en la salud humana, la magnitud del impacto en cada categoría se obtiene afectando la emisión por un factor de caracterización para obtener un resultado en las unidades de cada categoría, permitiendo sumar distintas sustancias que tienen impactos comunes.

Para esta aplicación se ha elegido la metodología TRACI 2.1 (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) que ha sido desarrollada desde el 2002 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Ha sido elegida por ser la que se adecua más al contexto existente en Arequipa, a diferencia de las metodologías europeas, además de tener categorías de impacto aplicables a nuestro medio y de fácil entendimiento.

Las categorías que se incluyen son contaminación de agotamiento del ozono, calentamiento global, criterios de salud humana, formación de smog, acidificación y eutrofización. A su vez la categoría de salud humana está dividida en tres, contaminantes cancerígenos, no cancerígenos y otros contaminantes. Los efectos de la formación de smog se mantuvieron separadas para poder ser analizadas independientemente.

Cada una de estas categorías tiene una unidad de ponderación, debido a que diversas sustancias generan los mismos efectos se utilizan estas unidades que permiten sumar los impactos y obtener un resultado por categoría. En la categoría de calentamiento global, por ejemplo, la unidad es el dióxido de carbono equivalente que sirve para cuantificar los efectos de esta y otras sustancias que influyan en esta categoría, multiplicando cada sustancia por un factor de conversión.

<i>Sustancia</i>	<i>CO₂ -equiv</i>
<i>Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	1
<i>Metano (CH₄)</i>	23
<i>Óxido Nitroso (N₂O)</i>	300

Tabla 2. Valores equivalentes de CO₂ para gases.

Acidificación (kg SO₂ equivalente)

La acidificación es el incremento de la concentración del ión hidrogeno (H⁺) en el ambiente, es un fenómeno por el cual el suelo y el agua pierden su capacidad neutralizante debido a la emisión de gases contaminantes (óxido de nitrógeno y dióxido de azufre) producidos mayormente por la combustión de diésel y gasolina que al entrar en contacto con el agua y el aire se transforma en ácidos y se precipitan a la tierra en la denominada lluvia ácida.

Este fenómeno tiene consecuencias negativas en la salud humana, corroe pinturas y superficie de objetos, aumenta la toxicidad de aguas subterráneas evitando su consumo y cambia el PH de los acuíferos, afectando la fauna marina.

TRACI 2.1 utiliza un modelo de acidificación que incorpora el potencial creciente de iones de hidrógeno en el medio ambiente sin considerar las características específicas del sitio, como la capacidad de ciertos entornos para proporcionar capacidad de amortiguación. (Jane Bare, 2014)

Eutrofización (kg N equivalente)

La eutrofización es el exceso de nutrientes en los cuerpos de agua, principalmente nitrógeno y fósforo que aceleran el crecimiento de algas y plantas y una indeseable acumulación de biomasa. Esta biomasa evita que la luz solar ingrese a las capas inferiores ocasionando la muerte de otras especies vegetales que serán alimento para bacterias que a su vez consumirán oxígeno necesario para la vida de peces y moluscos. Mientras que el fósforo tiene un impacto negativo en ríos y lagos, el nitrato afecta ecosistemas costeros.

La eutrofización es producida por actividades humanas como agricultura, contaminación atmosférica por óxidos de azufre y nitrógeno que reaccionan con el agua atmosférica para formar ion sulfato e ion nitrato y la contaminación urbana, cuando los efluentes urbanos no tienen tratamiento antes de llegar a los cuerpos de agua. Un ejemplo claro en nuestro país es la contaminación del lago Titicaca.

Cambio Climático Global (kg C02 equivalente)

El calentamiento global es el incremento promedio en la temperatura de la atmósfera terrestre, que puede ocasionar cambios en los patrones climáticos del planeta, actualmente se prefiere usar “cambio climático” en vez de calentamiento global para denotar que pueden existir otros cambios además del incremento de temperatura.

Las causas principales son el incremento de las emisiones de gases invernadero (GEI), causados principalmente por el incremento de uso de combustibles fósiles y la desaparición de los disipadores naturales debido al cambio de uso de tierras y deforestación.

De acuerdo con Tyndall Center (2003), el Perú estaría entre los diez países más vulnerables ante cambios climáticos lo que quedó demostrado con el último fenómeno del Niño que arrasó el norte. El cambio climático también es responsable de la pérdida del 22% de superficie glaciaria en el Perú, equivalentes a 10 años de consumo de agua de la ciudad de Lima. (Vargas, 2009).

La metodología usada está de acuerdo a los lineamientos dados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 2003).

Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 equivalente)

El ozono estratosférico es una capa que envuelve al planeta y lo protege, absorbiendo entre el 97% y 99% de los rayos ultra violeta del sol. Sin embargo, este ozono benigno se ha ido agotando por la emisión de sustancias químicas como los clorofluorocarbonos (CFC) e hidroc fluorocarbonos (HCFCs), usados como refrigerantes, agentes espumantes, solventes y en la fabricación de extinguidores.

Hace 20 años se firmó el protocolo de Montreal para disminuir la producción de estas sustancias, sin embargo, el Perú aún consume HCFCs siendo uno de los países con mayor radiación a nivel mundial. En el 2014 Arequipa registro niveles de radiación de 16 puntos y en el 2018 la radiación en la ciudad alcanzó de hasta 18 puntos, aunque el máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 11 puntos.

Existe consenso internacional sobre el uso del potencial de agotamiento del ozono (PAO), una medida propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para calcular la importancia relativa de las sustancias que pueden contribuir significativamente a la descomposición de la capa de ozono, este consenso brinda los lineamientos usados por TRACI en el desarrollo de la metodología de cálculo.

Formación fotoquímica de smog (kg O₃ equivalente)

El smog es un tipo de contaminación atmosférica que se produce en las ciudades debido a la emisión de contaminantes y el contexto climático. Los químicos que origina el smog incluyen óxidos de nitrógeno y componentes orgánicos volátiles (COV), los cuales expuestos a la luz solar originan el ozono a nivel del suelo o troposférico.

Los efectos en la salud humana pueden dar lugar a problemas respiratorios que incluyen el aumento de los síntomas de bronquitis, asma y enfisema. El daño pulmonar permanente puede ser el resultado de una exposición prolongada al ozono. Los impactos ecológicos incluyen daños a varios ecosistemas y daños a los cultivos. Las principales fuentes de precursores del ozono son los vehículos de motor, los servicios de energía eléctrica y las instalaciones industriales.

La metodología adoptada por TRACI es la desarrollada por Carter en el 2000 y que cuenta con más de 1200 de sustancias causantes catalogadas.

Particulados en la Salud Humana (kg PM_{2,5} equivalente)

Los particulados son pequeñas partículas suspendidas en el ambiente que causan efectos negativos sobre la salud humana incluyendo enfermedades respiratorias y la muerte.

Múltiples estudios epidemiológicos muestran un incremento en la tasa de mortalidad al existir niveles elevados de material particulado. Según estimaciones del 2016, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de defunciones prematuras. (OMS, n.d.)

El material particulado puede ser emitido como tal o puede originarse por reacciones químicas en el aire. Los precursores más comunes son el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Las fuentes de emisiones son la combustión de gasolina, diésel, maderas y las partículas de polvo de caminos y campos. El material particulado se divide en dos grupos: partículas gruesas inhalables que miden entre 2.5 y 10 micrómetros de diámetro, como el polvo en carreteras y partículas finas, que son más pequeñas o iguales a 2.5 micrómetros, y son a menudo producto de la combustión.

Según el Informe de Calidad del Aire emitido por el MINAM en el periodo 2007-2012 el material particulado PM₁₀ tiene una tendencia al descenso en la ciudad de Arequipa, si bien el promedio diario es menor al Estándar de Calidad Ambiental establecido (ECA) los valores máximos diarios registrados exceden ese valor en todos los años, alcanzando los 342 µg/m³. Se debe mencionar que los valores más elevados se registraron en el Cono Norte de la ciudad. El mismo informe indica que la concentración diaria de dióxido de azufre en la ciudad es de 24.4 µg/m³, mientras que el ECA establecido es de 20 µg/m³.

Para el cálculo de los impactos en la salud humana se modeló la proporción de sustancia emitida que se espera sea absorbida por un ser humano, tomando en cuenta factores como el incremento de concentración en el aire y la tasa de respiración de la población expuesta. Las sustancias se caracterizaron usando PM_{2.5} como la sustancia de referencia.

Sustancias Cancerígenas, no Cancerígenas y Eco toxicidad. (CTUh y CTUe)

Múltiples desarrolladores de modelos para cuantificar los efectos en la salud humana como son CalTOX, IMPACT 2002, USES-LCA, BETR, EDIP, WATSON, y EcoSense crearon un modelo con consenso global llamado EcoTox, que es el utilizado por TRACI. El modelo adopto muchas características de sus predecesores y permite desarrollar el potencial de toxicidad para más de 3000 sustancias.

Para la toxicidad cancerígena y no cancerígena se utiliza la unidad comparativa de toxicidad (CTU) por kilogramo de sustancia emitida, que corresponden al daño en seres humanos (CTUh), mientras que la ecotoxicidad se relaciona con el impacto negativo en las especies afectadas en un ecosistema (CTUe)

1 CTUh por kg. emitido = Casos de Enfermedad por kg. Emitido

1 CTUe por kg. emitido = PAF x m³ x día por kg. emitido (PAF = potencial de la fracción de especies afectadas)

En la ciudad de Arequipa solo existe un estudio epidemiológico con carácter de línea base realizada en el 2002-2003 por DIGESA, denominada “Prevalencia de Enfermedades Respiratorias en Niños asociados a la calidad del Aire”.

3.1.3. Ecoinvent V3.4 y ELCD 3.2

Las bases de datos usadas en este modelo fueron Ecoinvent V3 y ELCD 3.2 (European Life Cycle Database), la primera permite un acceso libre si se posee una licencia educacional y la segunda es totalmente de libre acceso.

Ecoinvent es desarrollada en Suiza por varias instituciones EMPA Dü, PSI, ETHZ UNS, FAL EMPA SG y ETHZ ICB, y posee más de 10 000 procesos disponibles para aplicaciones de ACV. La primera versión de la base de datos fue presentada en el 2003 y la que se ha usado en esta investigación fue lanzada en octubre de 2017. Ecoinvent es la base de datos más difundida y entre sus ventajas principales resalta la claridad de sus procesos, que permiten obtener resultados consistentes en materia de análisis de ciclo de vida.

ELCD 3.2 fue desarrollada por la Comisión Europea de Ciclo de Vida y fue presentada en Octubre de 2015, posee alrededor de 503 procesos relacionados con la fabricación de materiales, gasto energético y sistemas de transporte.

3.2. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS SEGÚN ISO 14040

3.2.1. Definición de Objetivo y Alcance.

Este estudio pretende servir como base determinando cuáles son los impactos ambientales más incidentes en los sistemas viales analizados, precediendo a investigaciones más detalladas en la materia que podrán enfocarse en los puntos críticos encontrados como conclusión de este. El segundo objetivo es la generación de información para facilitar la toma de decisiones en materia ambiental de las autoridades competentes, dado que a pesar de su importancia la gestión ambiental es un tema desestimado en el país.

Debido al cambio climático y a la ubicación geográfica de Arequipa, las autoridades municipales y provinciales se ven obligadas a rehabilitar o reconstruir las vías urbanas cada cierto tiempo. El pavimento semiflexible ha sido una opción generalizada debido a su costo y facilidad de instalación, pero en términos cuantitativos no hay una idea clara de los impactos ambientales que genera.

El alcance, de acuerdo a la norma ISO 14040, está definido por la función de los sistemas, sus límites generales y los criterios de reducción elegidos. En ese sentido, las dos vías tienen como función principal el tránsito de personas y vehículos e interconectan las zonas residenciales de Arequipa. Para poder realizar la comparación de los dos sistemas se ha elegido como **unidad funcional 1m² de vía pavimentada**, con un IMDA de 275 vpd, que corresponde al valor promedio obtenido de los expedientes técnicos de los modelos analizados. Como el objetivo del estudio es determinar qué tipo de pavimento posee mayor potencial de contaminación se considerará iguales condiciones de uso en los modelos (tráfico, velocidad, entre otros), de esta manera se eliminará dicha variable y se obtendrá solo los impactos ambientales inherentes al sistema de pavimentación.

A continuación, se muestran las tres etapas principales del ciclo de vida de los pavimentos.

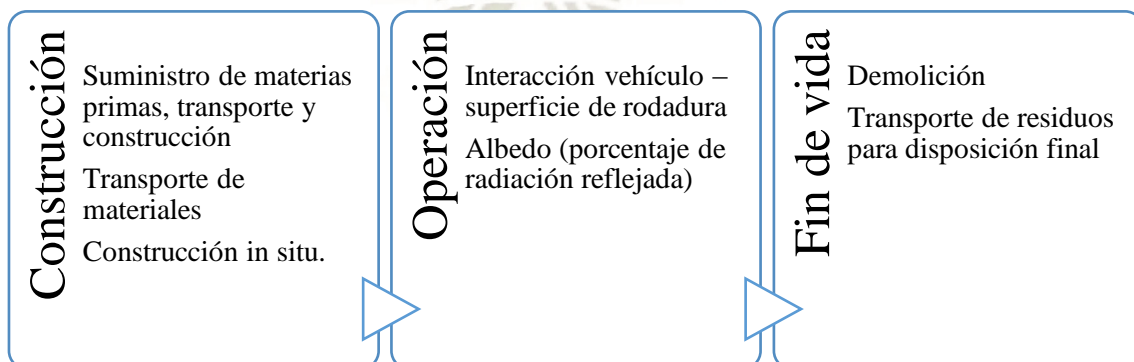


Figura 7 Ciclo de vida de pavimentos y procesos considerados en ellas. Elaboración propia

La etapa de construcción comprende el suministro, manufactura y transporte de materias primas hasta el lugar del proyecto, así como la construcción in situ. En la siguiente etapa se hará un análisis de la interacción vehículo - superficie de rodadura, considerando que la rugosidad del pavimento influye en la cantidad de combustible gastado. Así mismos se hará un análisis básico del albedo inherente a cada sistema, es decir la cantidad de radiación que reflejan las superficies estudiadas y que ayudan inducen un forzamiento radiativo positivo, representando una disminución en las emisiones de CO₂.

El periodo de análisis escogido es 20 años, que corresponde al periodo de diseño de ambos proyectos viales. De lo dicho anteriormente se desprende que el análisis no considerará reconstrucciones o rehabilitaciones masivas como parte del mantenimiento de las vías, por ser parte de un proceso más complejo y con múltiples escenarios posibles.

La etapa de fin de vida contempla la demolición y el transporte de los residuos sólidos para disposición final. Estas características son las únicas incluidas puesto que es complejo modelar los gastos energéticos involucrados en el reciclaje o re-uso de escombros y no es una práctica común en el medio.

3.2.2. Descripción de los sistemas a ser comparados

Los modelos estudiados se encuentran en el distrito de Tiabaya, provincia de Arequipa y son vías prácticamente paralelas por lo que comparten las características climáticas, suelo de fundación y características de tráfico descritas a continuación. El distrito de Tiabaya tiene una temperatura media anual de 15° C, el mes más frío es Julio con una temperatura mínima de 5.2 ° C y el más cálido es octubre con 24.2 °C. Es un clima templado y seco con precipitaciones durante los meses de febrero y marzo. Según los datos incluidos en la memoria descriptiva, la precipitación media anual en la zona es de 800 mm. (SENAHMI, 2018)

De acuerdo a los estudios de suelos de los proyectos estudiados, el suelo de fundación presenta granulometría mediana a gruesa con características de 8% a 53% de grava, 42% a 90% de arena y de 2% a 34% de finos no plásticos, es decir que el suelo predominante es una arena limosa, clasificada como SP-SM según SUCS. Existen además suelos de roca compacta y suelta con una incidencia del 5%, tipificados como suelos semirrocados, con presencia de bolonería de diferentes tamaños o diámetros.

Para ambos proyectos, se asumió como botadero de escombros la zona de Villa el Triunfo en el distrito de Sachaca, a una distancia de 6 km del proyecto, según las recomendaciones dadas por el estudio de impacto ambiental del proyecto de articulado.

Según una presentación del MINAM el 50% de vehículos del Perú usan Diésel (Concepcion, 2014), lo que se ajusta a la realidad del proyecto al ser Tiabaya muy cercano a campos agrícolas, un gran porcentaje de personas se desplazan en Pick Ups y pequeños camiones que utilizan dicho combustible. Ese porcentaje se comprueba con las estadísticas del INEI, el 2014 el 40% del parque automotor de Arequipa estaba conformado por vehículos que típicamente usan diésel.

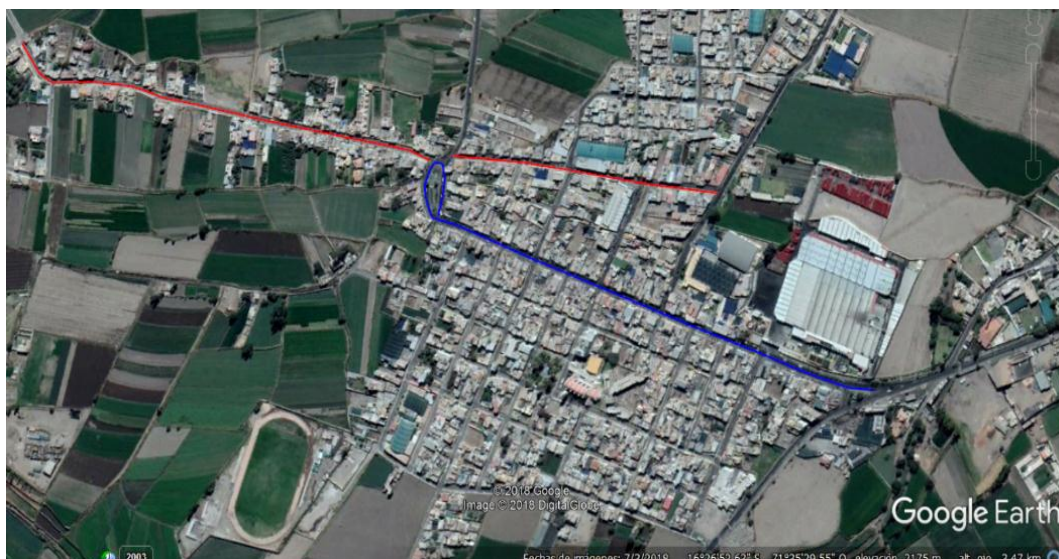


Figura 8. En rojo, la calle Miguel Grau y Prolongación, pavimentada con adoquines y en azul, la av. Arequipa, pavimentada con asfalto en frío. (Google Earth, 2015)

Al 2016, el 60% de vehículos de carga en el Perú tenían hasta 10 años de antigüedad y el 80% de vehículos de transporte de pasajeros tiene menos de 10 años de antigüedad. (MTC, 2016). Además durante el 2017 se importaron en Arequipa cerca de 43 mil vehículos nuevos, es decir que el parque automotor en la ciudad tiene entre 0 y 10 años de antigüedad en su mayoría. El consumo promedio para el parque automotor nuevo considerado es de 30 millas por galón o 48.28 km por galón (Concepcion, 2014), ya que no se pudo obtener mayor data acerca de las características de los vehículos circulantes se consideró este consumo para ambos, vehículos nuevos y antiguos, puesto que es un valor conservador y evitara obtener resultados exagerados que no se adecuen a la realidad.

MODELO 1

El primer modelo será un pavimento flexible en frío corresponde a la av. Arequipa, que es la principal vía colectora del distrito de Tiabaya. Debido al cierre de vías por obras en la Variante de Uchumayo, esta vía que originalmente fue diseñada para un tránsito residencial ligero fue convertida en vía de acceso a la ciudad. El proyecto de pavimentación se realizó en una longitud de 665 m, con un área equivalente de 7 631.71 m² en una calzada de doble sentido.

Para el diseño de la calzada se consideró un IMDA de 275, resultado del promedio de vehículos por día de ambos modelos. Además, se consideró un factor de crecimiento de 4% y un periodo de diseño de 20 años, un mejoramiento de la subrasante con 30% de grava en el batido, una base granular de 0.20 m de espesor con material entre ½ y 2". En el diseño de la carpeta asfáltica se consideró un riego de imprimación con MC-30, y una carpeta asfáltica de 0.05 m de espesor compuesta de agregado entre ½ y 1" y utilizando como material bituminoso un asfalto de curado rápido del tipo RC – 250, comúnmente conocido como mezcla en frío. La ejecución del proyecto tuvo una duración de 30 días, sin considerar los trabajos de señalización y acabados finales de la vía.

La cantera La ponderosa ubicada en el distrito de Uchumayo a 9.1 km del proyecto fue utilizada para la extracción de los materiales granulares necesarios, tanto para la base granular como para la mezcla asfáltica en frío.

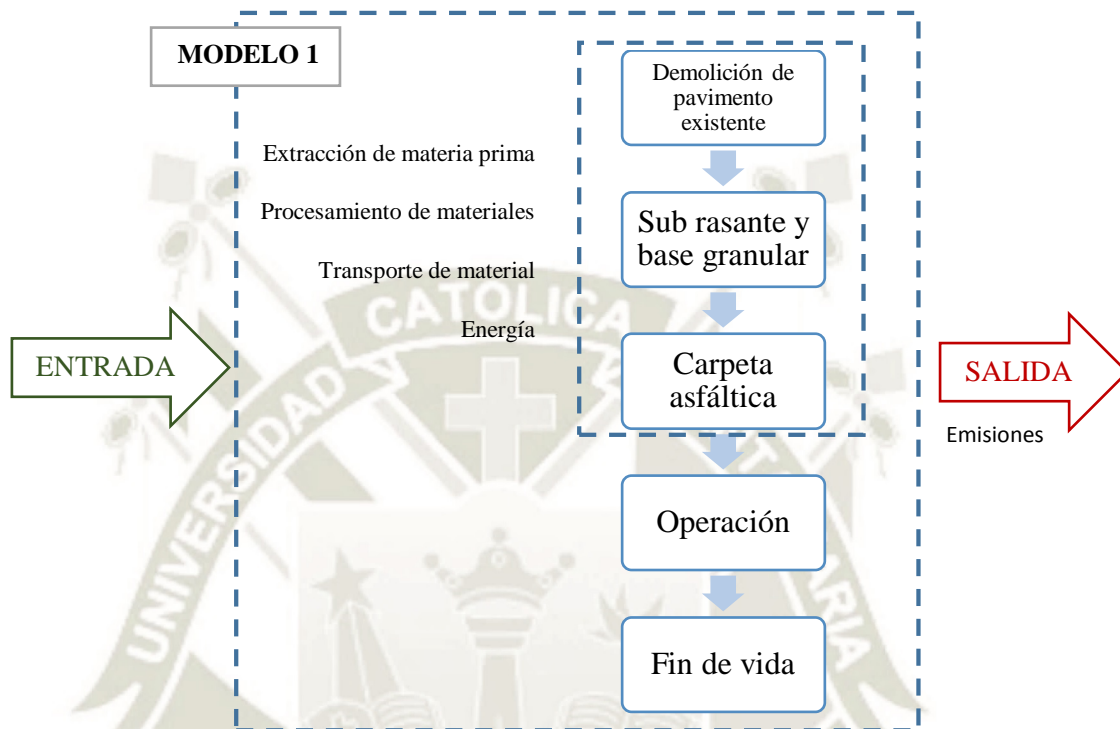


Figura 9. Límites del sistema para el modelo del modelo 1. Elaboración propia

MODELO 2

Para el modelo dos, pavimento articulado de concreto, se usó el proyecto de rehabilitación urbana llevado a cabo el 2017 en el mismo distrito, que considero el pavimentado de una vía en doble sentido con 1573 m de longitud correspondiente a la calle Miguel Grau y su prolongación, con un área equivalente de 9 907.04 m². Dicha ruta es considerada una vía colectora.

El diseño de la vía se realizó considerando una tasa de crecimiento anual (g%) de 3.04%, y un periodo de diseño de 20 años, similar al modelo 1. Al tener el mismo suelo de fundación que el proyecto anterior, también se realizó un mejoramiento de la subrasante y una base granular de 20 cm de espesor. Además, en el estudio se considera la colocación de una cama de arena de aproximadamente 0.04 m de espesor sobre la que se asientan adoquines tipo III de 80 mm de alto y 55 MPa o resistencia equivalente a 560 kg/cm².

Como parte de procedimiento constructivo se estimó el uso de sardineles de confinamiento de concreto $f'c=210$ kg/cm² que son prefabricados y adicionalmente se consideró otros elementos de arrojamiento transversal vaciados in situ ubicados en la transición entre el pavimento articulado y flexible.

La etapa de movimiento de tierras hasta el asentamiento de adoquines duró 40 días, sin contemplar los acabados finales ni la señalización de la vía. Los agregados para esta vía fueron obtenidos de la cantera Añashuayco ubicada en el cono norte de la ciudad a 12 km del proyecto. Los sardineles prefabricados y los bloques de adoquines se transportaron desde la planta de concretos SuperMix, localizada a 8.5 km de la vía.

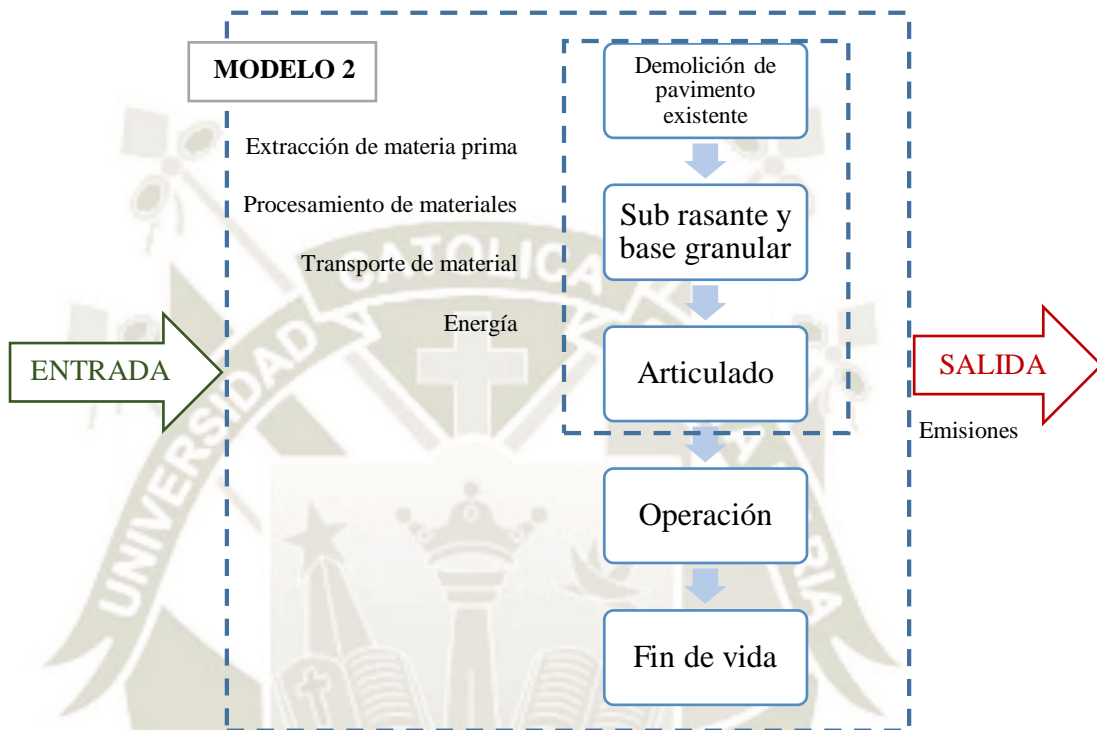


Figura 10. Límites del sistema para el modelo del modelo 1. Elaboración propia

3.2.3. Límite de los sistemas

Los límites geográficos y temporales considerados comprenden las vías colectoras escogidas, que han sido construidas en el distrito de Tiabaya, en la ciudad de Arequipa, ambas construcciones se han realizado en la presente década.

Se consideró que la tecnología para el desarrollo de la construcción es similar para ambos casos puesto que las empresas constructoras que realizaron los proyectos poseían equipos y técnicas similares, al igual que los estándares de seguridad, además no se considerara factores la señalización horizontal y vertical de las vías, por no tener gran influencia en los resultados.

No se consideran los procesos de mantenimiento de vías por no existir información al respecto y tampoco se considerará el tratamiento de los residuos al final de la vida útil de la vía puesto que es muy complicado modelar los insumos y emisiones de dichos procesos y no existe la información necesaria en nuestro medio.

3.3. DESARROLLO DEL MODELO

3.3.1. Selección de las vías ser estudiadas

En la provincia de Arequipa existen dos métodos comúnmente usados en la construcción de vías urbanas, pavimento flexible y pavimentos articulados. Los pavimentos escogidos son vías paralelas en Tiabaya, Arequipa. Se buscó que fueran cercanas para tener condiciones similares en el clima y suelo de fundación, así como en el volumen y características del tráfico que soportarían. Ambas vías tienen una antigüedad menor a 5 años y corresponden a las avenidas principales del distrito.

La primera corresponde a la Av. Arequipa, vía de ingreso al distrito. Fue reconstruida hace 6 años con una carpeta asfáltica en frío de 2 pulgadas. Tiene un carril en cada sentido y su ancho de calzada es de tres metros para cada carril. La segunda, pavimento articulado de concreto, corresponde a la Av. Miguel Grau y su prolongación. La vía, anteriormente de pavimento flexible, ha sido recientemente reconstruida.

A partir de la elección de los proyectos se comenzó a recopilar información de los mismos, se obtuvieron ambos expedientes técnicos con los metrados y análisis de precios unitarios, se realizó la búsqueda de datos faltantes, como las características de los agregados usados en cada vía, el ratio de consumo de combustible de la maquinaria en Arequipa. Además, se revisó la información disponible acerca de las características del tráfico de distintas instituciones gubernamentales.

3.3.2. Cuantificación de flujos y Análisis de Inventario

Una vez recopilada la información se procedió a organizarla en una hoja de Excel para obtener primero las entradas del sistema y luego del análisis en el software, obtener el inventario de ciclo de vida de los sistemas analizados. A continuación, se muestran los cálculos más relevantes realizados con este fin.

En las etapas de construcción el proceso consistió en extraer las cantidades de los análisis de precios unitarios y presupuestos, contrastarlas con información proveniente de empresas constructoras y agregar materiales, como agua corriente, no consideradas en muchas de las partidas.

Se realizó una compatibilización con los procesos existentes en las bases de datos usadas, por ejemplo, las cantidades de agregados por lo general están dadas en metros cúbicos y el proceso de extracción en cantera obtiene los flujos de la actividad por kilogramo extraído. Se consideraron los pesos específicos de acuerdo a cada cantera, basándose en la tesis de Arias K. En el caso del uso de maquinaria pesada, se contabilizó las horas maquina necesarias para la realización de 1 m² de pavimento.

Para las etapas de operación se empleó la metodología del CSHub presentada anteriormente, del análisis del albedo se obtuvo una cantidad de kg de CO₂ equivalente que se representaría como una emisión negativa. La reducción en la emisión de CO₂ en el pavimento articulado es el doble que en el pavimento flexible. Debido a que ambos proyectos son de renovación de pavimento flexible existente se consideró la reducción

de emisiones en el pavimento articulado, ya que en este modelo se presentaba un cambio en relación a la superficie de rodadura anterior.

Del análisis del gasto de combustible por rugosidad se obtuvo una cantidad de combustible gastada en un intervalo de 20 años de operación. A continuación, se muestran tablas con los valores considerados para el cálculo y los resultados obtenidos.

Pavimento Asfáltico		
Variación Albedo =	0.125	
Factor de reducción (Efrf) =	2.55	kg CO2 e/m2
Reducción (A) =	31.875	kg CO2 eq.
ADOQUINES		
Variación Albedo =	0.25	
Factor de reducción (Efrf) =	2.55	kg CO2 e/m2
Reducción (B) =	63.75	kg CO2 eq.
Reducción final (B-A) =	31.875	kg CO2 eq.

Tabla 3. Valores para el cálculo del impacto del albedo en pavimentos urbanos. Elaboración propia

<i>Pavimento Asfáltico</i>	<i>(Ecuaciones 1 y 2)</i>	
<i>IRI₀</i>	1.89	m/km
	119.75	in/mi
<i>Edad=</i>	20	años
<i>PI=</i>	0	% Índice de Plasticidad
<i>FI=</i>	0	Índice de congelación anual promedio
<i>Precip =</i>	800	mm Precipitación media anual
	31.5	in.
<i>SF =</i>	17.37	
<i>Fctotal=</i>	20.00	% Área de rotura por fatiga
<i>RD=</i>	1.5	in Profundidad de ahuellamiento
<i>IRI proyectado=</i>	218.51	in/mi
	3.45	m/km

Tabla 4. Valores para el cálculo del IRI proyectado en pavimento flexible. Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el IRI inicial considerado se obtuvo de la tesis de Vaca (Vaca, 2015), en la cual se midió el IRI de diversas vías urbanas en la ciudad de Lima, muchas de las cuales estaban recientemente refaccionadas.

En el caso del pavimento articulado de concreto se consideró como IRI final 4.5 m/km, el máximo valor de rugosidad permisible durante el periodo de servicio para vías con IMDA entre 201 y 400 vehículos según el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos en su sección 2, Suelos y Pavimentos.

TIPO DE CARRETERA	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO NUEVO IRI (M/KM)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA INICIAL PAVIMENTO REFORZADO IRI (M/KM)	RUGOSIDAD CARACTERÍSTICA DURANTE EL PERIODO DE SERVICIO IRI (M/KM)	OBSERVACIÓN
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 98%
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 85%

Tabla 5. Valores de Rugosidad Admisible IRI (m/km) según Tipo de Carretera. (Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos)

Con los valores proyectados del IRI, se calcula el gasto adicional de combustible debido al aumento de rugosidad multiplicando el gasto promedio por el porcentaje obtenido de la tabla desarrollada por Zaabar y Chatti.

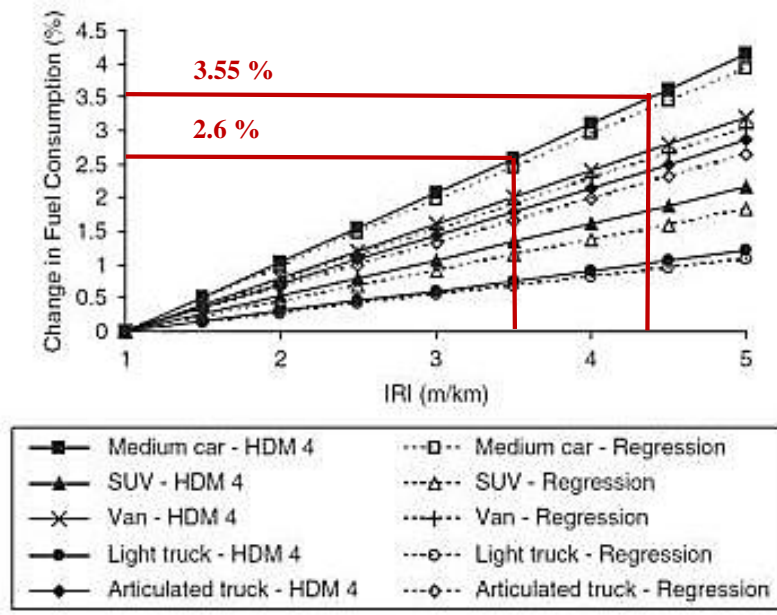


Figura 11. Valores de variación en consumo de combustible debido a IRI. Zaabar y Chatti.

Las ecuaciones siguientes permiten calcular el gasto de combustible por kilómetro recorrido a lo largo de periodo de operación para ambos tipos de combustible. Se consideró que el rendimiento del diésel por kilómetro era superior a la gasolina, por lo que se redujo el consumo en 11% para este combustible.

$$\text{Consumo adicional de gasolina (Gls)} = \frac{\text{Aumento de consumo (Gls/km)}}{2} \times \frac{\text{IMDp}}{2} \times \text{Tiempo de operación (días)}$$

$$\text{Consumo adicional de diésel (Gls)} = \frac{\text{Aumento de consumo (Gls/km)}}{2} \times \frac{\text{IMDp}}{2} \times \text{Tiempo de operación (días)} \times 0.89$$

Como se observa en las tablas 2, 3 y 4, existen valores relacionados a las condiciones ambientales de los pavimentos (clima, suelo de fundación) y otros relacionados con las características del tráfico. Estos valores se presentaron en la sección precedente, en la descripción de los modelos elegidos. Con los valores obtenidos anteriormente, se procedió a crear el ciclo de vida de los pavimentos en Open LCA.

	<i>Modelo 1</i>	<i>Modelo 2</i>	
	<i>Pav. Asfáltico</i>	<i>Pav. Articulado</i>	
<i>IRI proyectado</i>	3.45	4.50	m/km
<i>Aumento Consumo</i>	2.60%	3.55%	%
<i>Consumo Promedio</i>	48.28	48.28	km/gal
<i>Consumo Promedio</i>	0.02071251	0.02071251	gal/km
<i>Aumento consumo</i>	0.000539	0.000715	gal/km
<i>Tiempo de operación</i>	20	20	años
<i>Tasa de crecimiento</i>	4%	4%	veh.
<i>IMDp (Índice medio diario promedio)</i>	275	275	veh.
<i>Consumo rugosidad-Gasolina</i>	539.33	738.05	Gls
<i>Consumo rugosidad-Diesel</i>	480.00	656.87	Gls
<i>Ancho promedio de Calzada</i>	3.00	3.00	
<i>Consumo rugosidad-Gasolina</i>	0.18	0.25	Gls/m2
<i>Consumo rugosidad-Diesel</i>	0.16	0.22	Gls/m2

Tabla 6. Cálculo del consumo de combustible por rugosidad. Elaboración propia

3.3.3. Uso del Software OpenLCA 1.7.0

Los modelos se desarrollaron en el software Open LCA 1.7.0 (GreenDelta 2017), utilizado dos bases de datos, Ecoinvent V3 y ELDC, en las que existen más de 3000 procesos disponibles. Tanto el software elegido y las bases de datos son intuitivos y Green Delta ofrece una amplia gama de recursos virtuales de libre acceso como manuales, videos explicativos y ejemplos de modelos simplificados para entender el funcionamiento, por lo que se eligió trabajar con ellas.

Open LCA 1.7.0 permite trabajar con varias bases de datos simultáneamente, así como importar y exportar conjuntos de datos gracias al soporte de distintos formatos de datos lo que lo hace ideal para el modelado de productos de cualquier tipo. Las bases de datos elegidas permiten seleccionar procesos específicos para cada actividad, aunque en la mayoría de casos los procesos han sido obtenidos con información relativa a un espacio geográfico estos pasan por un proceso de transformación que elimina las características inherentes a ese espacio y lo hacen aplicable a un contexto global. Ecoinvent V3 cuenta con una licencia educacional y ELDC es de libre acceso, por lo que se pudieron utilizar en esta investigación.

Es importante volver a mencionar que existen dos formas de modelar los flujos de un producto, mediante procesos unitarios y procesos de sistema. El primero contiene los flujos y emisiones asignados a cada proceso o etapa de producción del producto, creándose relaciones entre las diferentes etapas y obteniendo menor grado de incertidumbre en el cálculo de los mismos.

El segundo método considera todos los flujos del producto en una sola etapa, sin generar relaciones entre las etapas por lo que al final no se sabe que información está asociada a cada proceso, aunque el proceso de cálculo es más rápido. En esta aplicación se utilizó procesos unitarios porque uno de los fines principales es la comparación por etapas del ciclo de vida de cada modelo.

Los elementos que se necesitan para modelar y comparar productos en OpenLCA son flujos, procesos, productos sistemas y proyectos. Los flujos son la unidad básica y pueden ser materiales o energía que entran al sistema (inputs) o emisiones y descargas producidas por los procesos (outputs). Cada flujo está definido por su nombre, tipo y su unidad de referencia (masa, por ejemplo). En el siguiente esquema se muestra un ejemplo simplificado del modelo estudiado para un mejor entendimiento.

En la mayoría de casos no se cuenta con información modelada específicamente para el Perú, sobre todo en los procesos de producción de materias primas como cemento y asfalto, para esos casos se utilizó inventarios correspondientes al resto del mundo y se analizaron los flujos incluidos para adaptarlos en lo posible al contexto del estudio. Para cada caso se eligió la información más adecuada. Los flujos considerados para cada proceso se encuentran en los anexos 1 y 2.

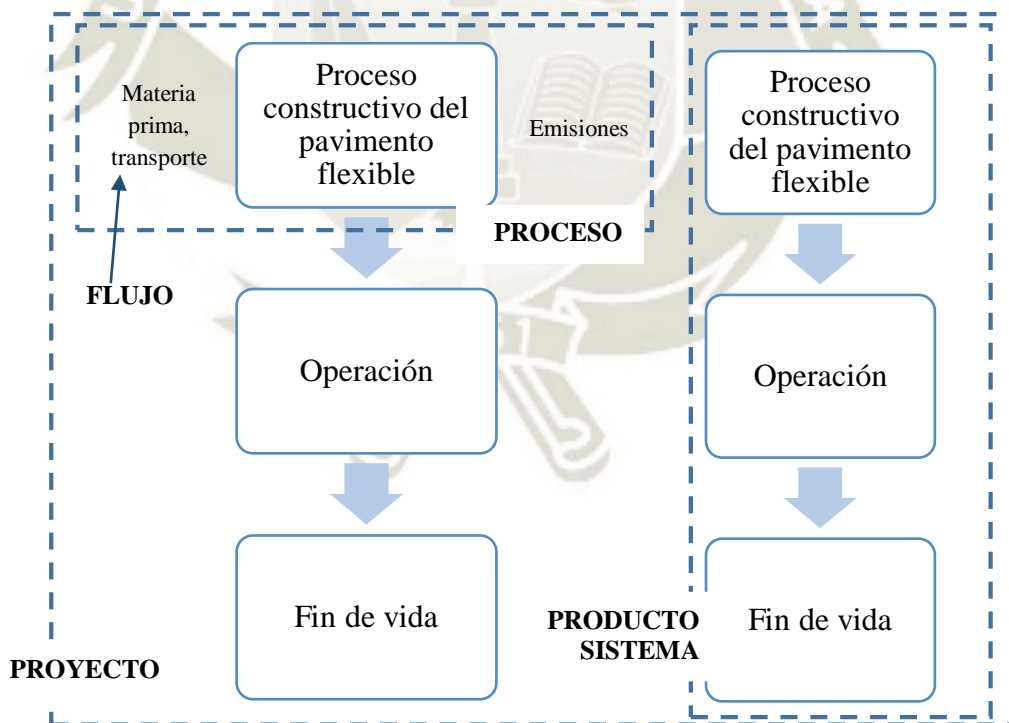


Figura 12. Representación esquemática de los elementos de la base de datos. Elaboración propia

3.3.4. Creación de los procesos

El primer paso será la creación de los flujos productos o flujos de referencia que son los que relacionarán cada proceso unitario con su predecesor y son la consecuencia de estos. Por ejemplo, el resultado y flujo de referencia de la etapa de demolición de pavimento existente será un metro cuadrado de superficie sin pavimento, que a su vez es un ingreso para el siguiente proceso unitario, colocación de base granular. Cada flujo creado necesita un nombre, un tipo (si es un producto, un flujo elemental o un desecho) y una unidad de análisis.

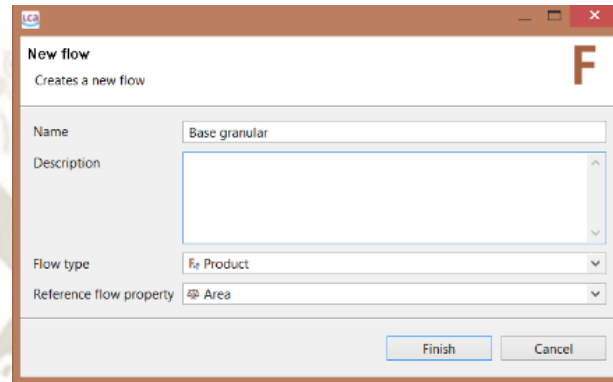


Figura 13. Creación de un flujo nuevo en el software OpenLCA (OpenLCA)

A continuación, se presenta los procesos existentes en la base de datos, están organizados por categorías principales como materiales de construcción, tratamientos de fin de vida, etc. Es importante mencionar que de no existir procesos desarrollados específicamente para una ubicación geográfica se deben utilizar aquellos que tienen características globales, en los cuales se han eliminado las variables relacionadas a un medio geográfico en específico. En el lado derecho de la vista se observa la pestaña de información general de un proceso seleccionado, donde se puede observar la descripción y otros datos que son útiles para determinar si el proceso puede ser usado en el modelo.

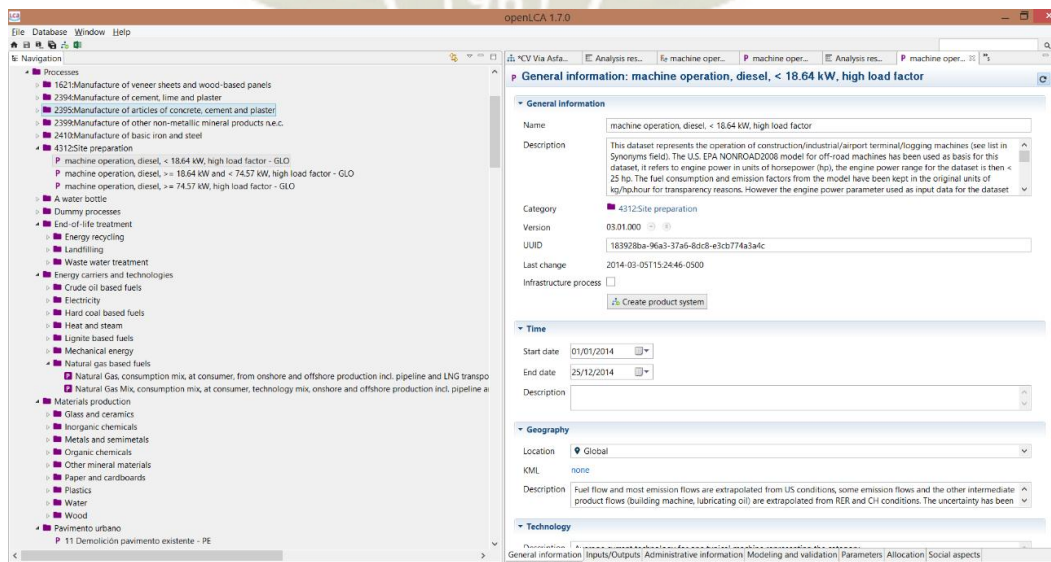


Figura 14. Organización de procesos en base de datos e información general de un proceso de inventario. (OpenLCA)

Luego de la creación de los flujos de referencia se crearán los procesos unitarios. Con la finalidad de simplificar el entendimiento de modelo se han unido varias etapas del procedimiento constructivo relacionadas entre sí, estas agrupaciones se muestran en la tabla 6.

Una vez creados el proceso unitario es necesario ingresar la descripción general del proceso, la información que corresponda de los metrados, las bases de datos y otra información que se haya recopilado que serán los inputs y outputs del proceso.

Pavimento	Proceso unitario	Etapas del procedimiento constructivo
Pavimento flexible	Demolición de pavimento existente	Demolición de pavimento existente y eliminación
	Sub rasante y base granular	Extracción de material selecto de cantera.
		Perfilado, nivelación, riego, compactado y conformación de subrasante.
		Transporte de material selecto en cantera.
		Conformación de la base granular
	Carpeta asfáltica	Producción de MC-30 y RC-250
		Extracción de material selecto de cantera.
		Transporte de materiales a pie de obra
		Riego de Imprimación
		Colocación de carpeta asfáltica en frío
Articulado	Demolición de pavimento existente	Demolición de pavimento existente
	Sub rasante y base granular	Extracción de material selecto de cantera.
		Perfilado, nivelación, riego, compactado y conformación de subrasante.
		Transporte de material selecto en cantera.
		Conformación de la base granular
	Articulado	Extracción y transporte de material selecto de cantera.
		Producción y transporte de cemento y elementos prefabricados (adoquines y sardineles)
		Colocación de cama de arena
		Colocación de los adoquines
		Sardineles de concreto prefabricado
		Elementos de arriostre vaciados in situ.
		Colocación de sello de arena

Tabla 7. Actividades de extracción, producción y construcción consideradas en los procesos unitarios.
Elaboración propia.

Un proceso unitario creado en OpenLCA se muestra en la imagen siguiente, en la parte superior se encuentran los inputs, en el caso de operación de la vía adoquinada son los combustibles y el flujo producto del proceso anterior, el pavimento urbano. En la parte inferior de la imagen se observan los outputs y emisiones al medio ambiente, que son los compuestos producto de la combustión, la reducción de emisiones gracias al albedo del concreto y el flujo de referencia del proceso que es la unidad de pavimento en operación. Se debe notar que todas las cantidades ingresadas están de acuerdo a la unidad funcional, el m2 de pavimento urbano.

En la pestaña de descripción se nombra al proceso, se explican los alcances y límites del proceso, su ubicación geográfica, tecnología usada y otra información relevante. Además, existen otras pestañas donde se puede ingresar información administrativa y aspectos sociales que pueden ser necesarias dentro del alcance del proyecto.

Cuando se han creado todos los procesos involucrados en el ciclo de vida se creará el producto sistema que tendrá como proceso de referencia el último proceso del ciclo de vida, en el caso de ambos pavimentos es la demolición final. También se muestra el diagrama de flujos de proceso para cada pavimento.

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality ...	Description
F ₁ A Pavimento intertrabado	Pavimento Urbano	1.00000	m2		none		P 3 A Adoqu...		
F ₂ diesel - PE	Energy carriers and technolo...	0.21000	gal (US liq)		none		P Diesel, co...		
F ₃ gasoline (regular)	Energy carriers and technolo...	0.24000	gal (US liq)		none		P Gasoline (r...		

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data quality ...	Description
F₁ A Pavimento en uso	Pavimento Urbano	1.00000	m2		none				
F ₂ Ammonia	Emission to air/low populati...	1.00000E-5	kg		none				Diesel com...
F ₃ Benzene	Emission to air/low populati...	1.00000E-5	kg		none				Diesel com...
F ₄ Benzene	Emission to air/low populati...	0.00950	kg		none				Petrol (gas...
F ₅ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	2.08000	kg		none				Diesel com...
F ₆ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	1.84200	kg		none				Petrol (gas...
F ₇ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	-31.88000	kg		none				Dismnucio...
F ₈ Carbon monoxide, fossil	Emission to air/low populati...	0.00543	kg		none				Diesel com...
F ₉ Carbon monoxide, fossil	Emission to air/low populati...	0.63300	kg		none				Petrol (gasolina) coi
F ₁₀ Dinitrogen monoxide	Emission to air/low populati...	0.00012	kg		none				Diesel com...
F ₁₁ Dinitrogen monoxide	Emission to air/low populati...	0.00013	kg		none				Petrol (gas...
F ₁₂ Heat, waste	Emission to air/low populati...	30.27000	MJ		none				Diesel com...
F ₁₃ Heat, waste	Emission to air/low populati...	27.69000	MJ		none				Petrol (gas...
F ₁₄ Lead	Emission to air/low populati...	0.00010	kg		none				Petrol (gas...
F ₁₅ Methane	Emission to air/low populati...	0.00013	kg		none				Diesel com...
F ₁₆ Methane	Emission to air/low populati...	0.00180	kg		none				Petrol (gas...
F ₁₇ Nitrogen oxides	Emission to air/low populati...	0.02790	kg		none				Diesel com...
F ₁₈ Nitrogen oxides	Emission to air/low populati...	0.01230	kg		none				Petrol (gas...
F ₁₉ NMVOC, non-methane volatile organ...	Emission to air/low populati...	0.00180	kg		none				Diesel com...
F ₂₀ NMVOC, non-methane volatile organ...	Emission to air/low populati...	0.01090	kg		none				Petrol (gas...
F ₂₁ Particulates, < 2.5 um	Emission to air/low populati...	0.00290	kg		none				Diesel com...
F ₂₂ Particulates, < 2.5 um	Emission to air/low populati...	0.00302	kg		none				Petrol (gas...
F ₂₃ Sulfur dioxide	Emission to air/low populati...	0.00070	kg		none				Diesel com...

Figura 15. Entradas y salidas para el proceso unitario de operación de pavimento articulado. OpenLCA

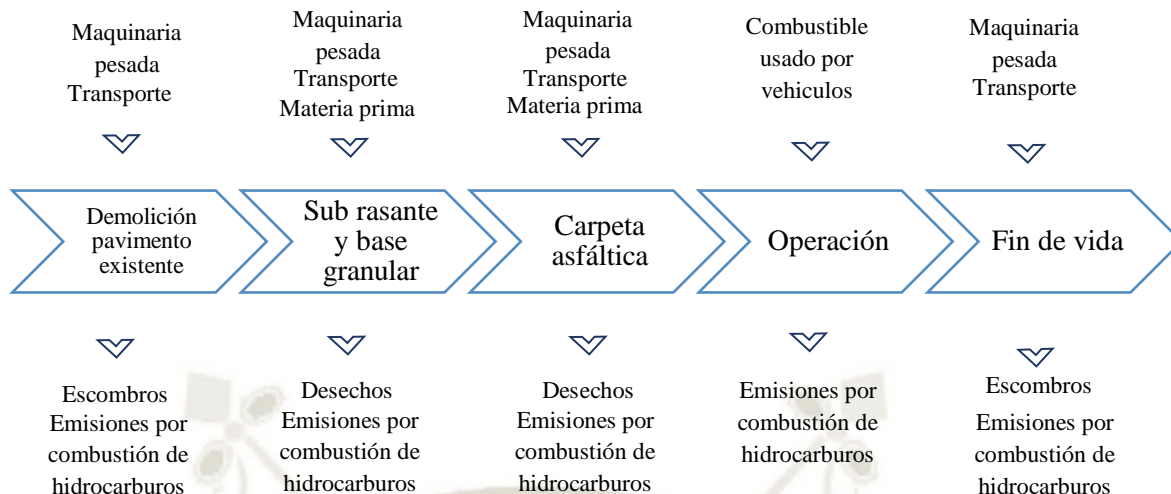


Figura 16. Diagrama de flujos de procesos para pavimento asfáltico. Elaboración Propia

En el anexo 1 y 2 del presente documento se puede observar mayor detalle de los inputs considerados en cada proceso de ambos sistemas de pavimentación y en los siguientes anexos (3 y 4) se encuentra el listado de emisiones del ciclo de vida de cada pavimento.

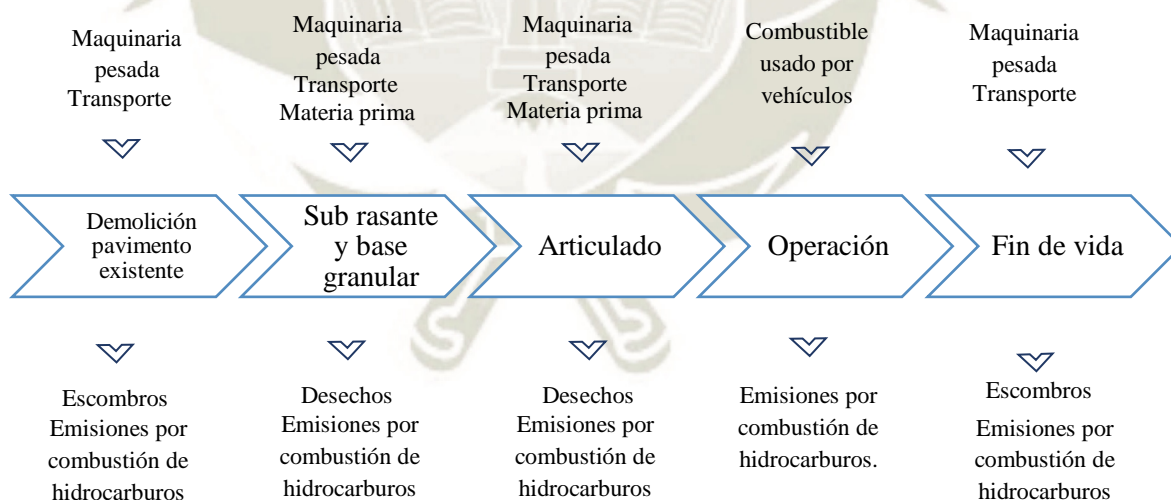


Figura 17. Diagrama de flujo de procesos para pavimento articulado. Elaboración Propia

3.3.5. Montaje del ciclo de vida

Una vez creados los procesos unitarios se llevara a cabo el montaje del ciclo de vida. Dentro de la base de datos se crea un nuevo producto sistema que necesita un proceso de referencia. Ya que todos los procesos estan relacionados entre si por medio de su flujo producto se seleccionara el último proceso unitario como proceso de referencia.

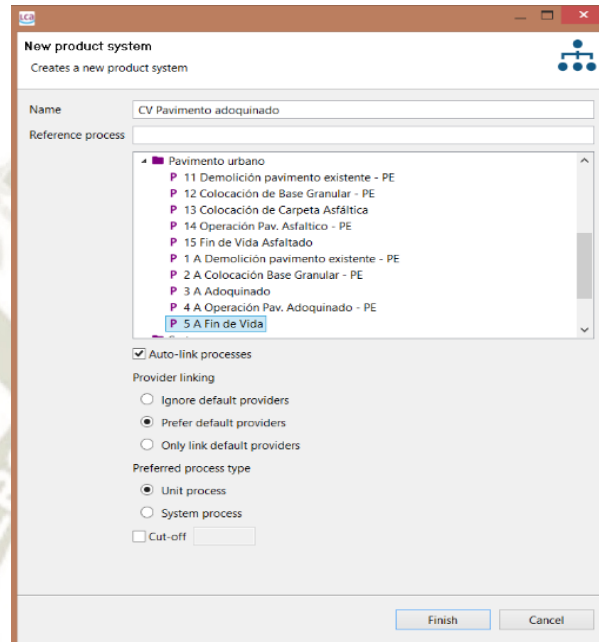


Figura 18. Creación de un producto sistema. Montaje del ciclo de vida. OpenLCA

Las opciones de proveedores sirven para elegir si se considerarán las emisiones de los procesos que intervienen o anteceden los procesos creados, por ejemplo si se utiliza cemento portland en los sardineles el proveedor sera el proceso de fabricación del árido. Se realizara un análisis por procesos unitarios por lo que se selecciona esa opción y finalmente, se nombra el sistema creado. A continuación se muestra el menú utilizado en OpenLCA para la creación del ciclo de vida y el esquema de los procesos involucrados en el ciclo de vida del pavimento articulado. Este procedimiento sera similar para ambos modelos.

3.3.6. Caracterización

OpenLCA permite el uso de distintas metodologías de caracterización de impactos ambientales, en esta investigación se decidió aplicar la metodología del EPA, TRACI2.1 (EPA 2012) la que ya ha sido presentada en secciones anteriores. Los cálculos necesarios para obtener los impactos ambientales son realizados por el software.

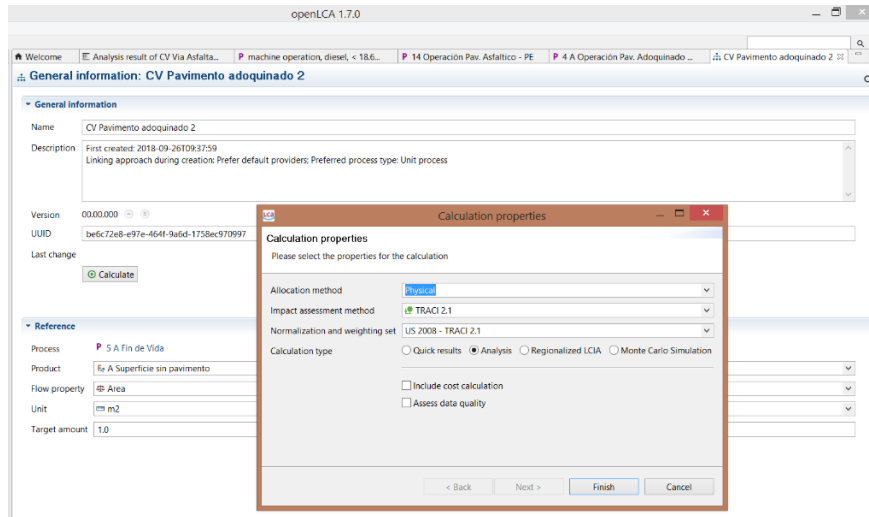


Figura 19. Aplicación de TRACI 2.1 al ciclo de vida del articulado. OpenLCA

3.3.7. Obtención y presentación de los resultados

Los valores resultantes del cálculo se pueden exportarse a Excel. Se obtiene el inventario completo del ciclo de vida, los resultados en las categorías de impacto existentes en TRACI 2.1 y el árbol de procesos del ciclo de vida de cada pavimento urbano. La información obtenida se procesa a través de tablas y cuadros comparativos para su análisis.

Impact analysis: ADOQUINADO 3

Subgroup by processes Cut-off 1 %

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
▶ Ozone depletion - TRACI 2.1				2.15971E-8	kg CFC...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			1.30466E-8	kg CFC...
▶ Diesel, consumption mix, at refinery, from crude oil, 200 ppm sul	Energy carriers and technologies / Crud...			5.38888E-9	kg CFC...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			3.16164E-9	kg CFC...
▶ Carcinogenics - TRACI 2.1				5.21085E-8	CTUh
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312Site preparation			4.57396E-8	CTUh
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			2.73738E-9	CTUh
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			1.58805E-9	CTUh
▶ Diesel, consumption mix, at refinery, from crude oil, 200 ppm sul	Energy carriers and technologies / Crud...			1.27916E-9	CTUh
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			7.53094E-10	CTUh
▶ Smog - TRACI 2.1				9.07612	kg O3 eq
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312Site preparation			9.45150	kg O3 eq
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			0.39532	kg O3 eq
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			0.18660	kg O3 eq
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			-1.00344	kg O3 eq
▶ Respiratory effects - TRACI 2.1				0.01554	kg PM2...
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312Site preparation			0.02038	kg PM2...
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			0.00092	kg PM2...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			0.00034	kg PM2...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			0.00025	kg PM2...
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			-0.00649	kg PM2...
▶ Global warming - TRACI 2.1				51.29395	kg CO2 ...
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312Site preparation			91.65801	kg CO2 ...
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			27.83525	kg CO2 ...
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			3.69060	kg CO2 ...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			1.43191	kg CO2 ...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			0.82642	kg CO2 ...
▶ cement production, pozzolana and fly ash 15-40%, US only - GLO	2394Manufacture of cement, lime and ...			-74.44757	kg CO2 ...
▶ Fossil fuel depletion - TRACI 2.1				0.00000	MJ surp...

General information | Inventory results | Impact analysis | Normalization and weighting | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram

Figura 20. Resultados por categoría de impacto ambiental. TRACI 2.1. OpenLCA

3.3.8. Análisis comparativo de los resultados

Con los resultados procesados, se realizará un análisis comparativo de los dos modelos estudiados. El metro cuadrado de pavimento será la unidad funcional para comparar ambos sistemas.

Se realizarán dos comparaciones, la primera dentro de cada sistema producto, entre cada etapa del ciclo de vida y la segunda será una comparación global entre ambos sistemas para determinar cuál de los dos tiene más potencial de impacto ambiental. Además, se revisará un análisis simplificado en escenarios posibles, considerando variaciones positivas en el tráfico de vehículos y el ahorro en combustible por rugosidad mediante un mantenimiento adecuado a las vías.



4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. INDICADORES AMBIENTALES TRACI 2.1

A continuación, se presentan los impactos potenciales obtenidos de aplicar la metodología de la Agencia de Protección Ambiental, TRACI 2.1, en los modelos de ciclo de vida desarrollados. En el anexo 1 se muestran los flujos considerados en cada proceso unitario.

4.1.1. Modelo 1. Pavimento Flexible en Frio.

El modelo 1, correspondiente al pavimento flexible en frío, obtuvo los resultados presentados a continuación. Primero se muestra los impactos obtenidos en la fase de construcción (Demolición, base granular y asfaltado) y a continuación se muestra el resultado global de dicha etapa comparándola con la operación y el fin de vida.



Figura 21. Proceso considerado en la tabla 7. Elaboración propia

Categoría de Impacto	Demolición		Base Granular		Asfaltado		Total
Acidificación (kg SO ₂ eq)	0.0037	0.32%	0.1389	11.82%	1.0326	87.86%	1.175
Sust. Cancerígenas (CTUh)	6.27E-10	0.07%	2.06E-08	2.31%	8.69E-07	97.62%	8.90E-07
Ecotoxicidad (CTUe)	0.0245	0.09%	0.7828	2.90%	26.1732	97.01%	26.980
Eutrofización (kg N eq)	0.0002	0.62%	0.0087	22.93%	0.0291	76.45%	0.038
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq)	1.2479	1.86%	44.7318	66.57%	21.2138	31.57%	67.193
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	6.98E-09	0.61%	2.34E-07	20.48%	9.02E-07	78.91%	1.14E-06
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	8.64E-11	2.41%	1.92E-09	53.48%	1.58E-09	44.11%	3.59E-09
Efectos respiratorios (kg PM _{2.5} eq)	0.0003	0.39%	0.0101	14.03%	0.0613	85.58%	0.072
Smog (kg O ₃ eq)	0.1296	0.97%	4.6505	34.97%	8.5192	64.06%	13.299

Tabla 8. Impactos potenciales durante la etapa de construcción del modelo 1 (Pavimento flexible)

En la construcción del pavimento flexible la mayoría de impactos ambientales se producen en la etapa de asfaltado debido a las emisiones consecuencia de la producción del bitumen y colocación de la carpeta asfáltica. El pavimento asfáltico en frío (RC-250) genera principalmente compuestos orgánicos volátiles (VOC por sus siglas en inglés), que generan la mayoría de cargas ambientales relacionadas a salud humana y eco toxicidad en la etapa de construcción. El proceso unitario “base granular” genera el mayor impacto en la categoría de calentamiento global y agotamiento de ozono debido a la combustión de diésel durante el uso de maquinaria pesada y la extracción y transporte de materias primas desde las canteras.

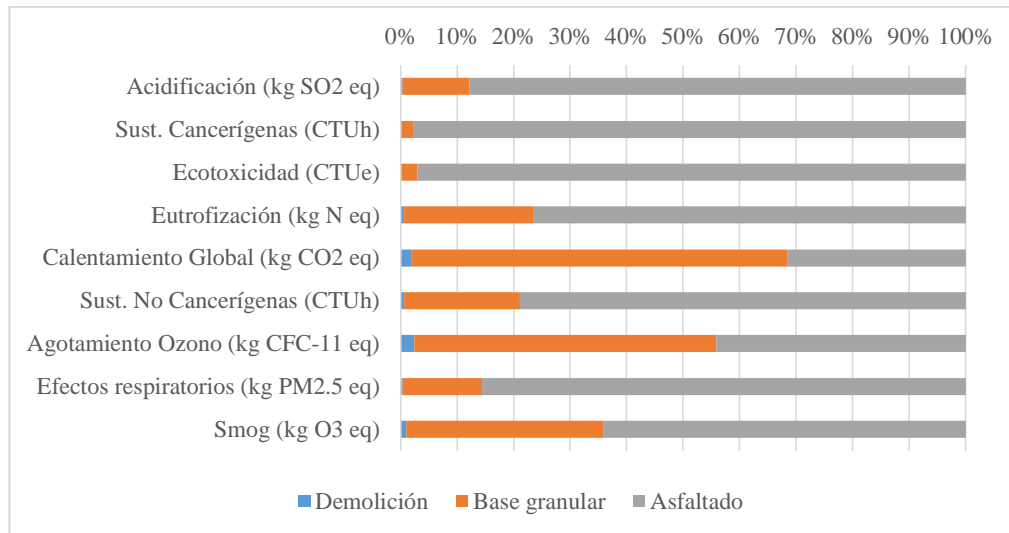


Figura 22. Incidencia de las etapas de construcción en las categorías de impacto. Modelo 1. Elaboración propia

Para el total del ciclo de vida la etapa de construcción genera el mayor porcentaje de impactos ambientales, contribuyendo en más del 80% con el calentamiento global, la acidificación del medio, la emisión de sustancias cancerígenas, eutrofización y la formación de smog. Sin embargo en las categorías de sustancias no cancerígenas, agotamiento de ozono y efectos respiratorios la figura se revierte y la etapa de operación posee mayor influencia debido a las emisiones de metano y etano (combustión de gasolina) y material particulado durante la operación. El fin de vida, considerando solo la demolición y transporte de escombros casi no tiene implicancias en los impactos ambientales.

En los siguientes gráficos se muestran los resultados para el modelo 1, considerar que los resultados correspondientes a Construcción son el la suma de los tres procesos unitarios (Demolición, colocación de base granular y asfaltado) que componen dicha etapa.



Figura 23. Proceso considerado en la tabla 8. Elaboración propia

Categoría de Impacto	Construcción		Operación		Fin de Vida		Total
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	
Acidificación (kg SO2 eq)	1.175	97.88%	0.025	2.07%	0.001	0.05%	1.20
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.90E-07	99.39%	5.38E-09	0.60%	8.96E-11	0.01%	8.959E-07
Ecotoxicidad (CTUe)	26.980	99.27%	0.196	0.72%	0.003	0.01%	27.18
Eutrofización (kg N eq)	0.038	96.27%	0.001	3.64%	0.000	0.09%	0.04
Calentamiento Global¹ (kg CO2 eq)	67.193	94.77%	3.609	5.09%	0.099	0.14%	70.90
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.14E-06	54.00%	9.73E-07	45.98%	4.23E-10	0.02%	2.116E-06
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	3.59E-09	27.00%	9.59E-09	72.17%	1.10E-10	0.83%	1.33E-08
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.072	46.06%	0.084	53.92%	3.11E-05	0.02%	0.16
Smog (kg O3 eq)	13.299	94.40%	0.773	5.49%	0.015	0.11%	14.09

Tabla 9. Impactos potenciales durante el ciclo de vida del modelo 1 (Pavimento flexible)

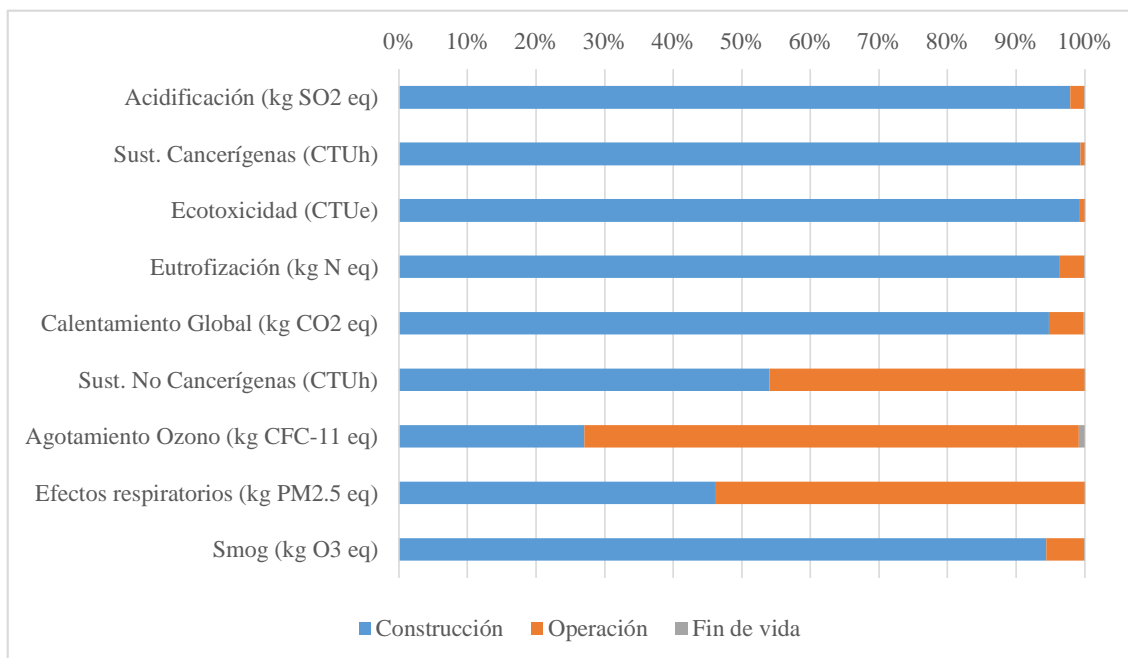


Figura 24. Incidencia de las etapas del ciclo de vida en las categorías de impacto. Modelo 1. Elaboración propia

¹ En la etapa de operación se consideró que para el modelo 1, el “ahorro” en emisiones de CO2 equivalente debido al albedo de la superficie asfáltica es igual a 0, partiendo de que las vías se deben pavimentar y el peor escenario posible es el correspondiente al pavimento flexible en términos de forzamiento radiativo.

4.1.2. Modelo 2. Pavimento Articulado de Concreto

El modelo 2, correspondiente al pavimento articulado de concreto, obtuvo los resultados que se presentan a continuación. Primero se muestra los impactos obtenidos en la fase de construcción y a continuación se muestra el resultado global de dicha etapa comparándola con la operación y el fin de vida.

De la tabla y grafico siguientes se observa la colocación de base granular y los procesos que la preceden son los que generan mayores cargas ambientales, debido al uso de combustibles fósiles en el transporte de materia prima y durante la utilización de maquinaria. No obstante la colocación de los bloques de concreto tiene consecuencias mayores en las categorías de agotamiento de ozono y calentamiento global, donde significan más del 50% del potencial de impacto. Si bien el articulado no emplea tanta maquinaria y el proceso es más bien manual, las emisiones provienen de la producción del cemento. Según datos del FICEM, en promedio se generan 900 kilogramos de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento producida. Por otra parte, la demolición del pavimento existente adquiere mayor relevancia en este modelo, pero continúa sin representar más del 5% de los impactos durante la construcción.



Figura 25. Proceso considerado en la tabla 9. Elaboración propia

Categoría de Impacto	Demolición		Base Granular		Articulado		Total
Acidificación (kg SO2 eq)	0.0054	3.28%	0.1368	83.19%	0.0223	13.53%	0.164
Sust. Cancerígenas (CTUh)	9.11E-10	3.59%	2.01E-08	79.40%	4.31E-09	17.00%	2.54E-08
Ecotoxicidad (CTUe)	0.0344	3.30%	0.7692	73.71%	0.2399	22.99%	1.043
Eutrofización (kg N eq)	0.0003	3.31%	0.0086	83.76%	0.0013	12.93%	0.010
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	1.8297	1.44%	43.7190	34.48%	81.2476	64.08%	126.796
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.04E-08	3.68%	2.28E-07	80.25%	4.56E-08	16.07%	2.84E-07
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	4.00E-11	0.38%	4.48E-09	42.18%	6.10E-09	57.45%	1.06E-08
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.0004	3.43%	0.0098	83.03%	0.0016	13.54%	0.012
Smog (kg O3 eq)	0.1885	3.46%	4.5537	83.51%	0.7109	13.04%	5.453

Tabla 10. Impactos potenciales durante la etapa de construcción del modelo 2 (Pavimento articulado)

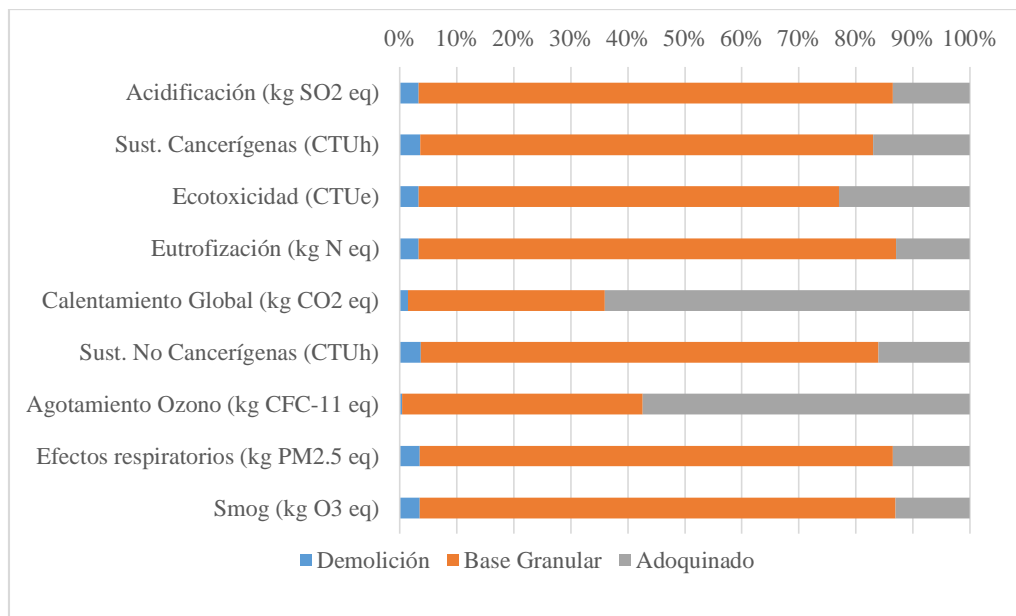


Figura 26. Incidencia de la etapa de construcción en las categorías de impacto. Modelo 2. (Elaboración propia)

En los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos considerando todo el ciclo de vida del pavimento articulado, los resultados correspondientes al proceso de Construcción son el total de los tres procesos unitarios que componen dicha etapa.

Para el ciclo de vida del modelo 2, el proceso de construcción posee mayor influencia en los impactos ambientales representando alrededor del 80% en seis categorías. La etapa de operación de la vía genera mayores impactos en las categorías de sustancias no cancerígenas y agotamiento de ozono debido a los clorofluorocarbonos producto de la combustión.

En cuanto a efectos respiratorios la construcción genera el 60% de los impactos, mientras que el restante es en su mayoría debido a la operación. Un dato resaltante es el “impacto positivo” en la categoría de calentamiento global, se observa que debido al mayor albedo de una superficie de concreto, se reduce en un 26.61% las emisiones de CO2 equivalente (Considerando solo los impactos directos de la vía y sin tomar en cuenta las emisiones de vehículos). La etapa de fin de vía representa en todos los casos menos del 3% de los posibles impactos ambientales generados.



Figura 27. Proceso considerado en la tabla 10. Elaboración propia

Categoría de Impacto	Construcción		Operación		Fin de Vida		Total
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	
Acidificación (kg SO2 eq)	0.164	80.47%	0.034	16.66%	0.006	2.87%	0.20
Sust. Cancerígenas (CTUh)	2.54E-08	76.44%	6.87E-09	20.69%	9.54E-10	2.87%	3.3E-08
Ecotoxicidad (CTUe)	1.043	77.80%	0.261	19.44%	0.037	2.76%	1.33
Eutrofización (kg N eq)	0.010	81.48%	0.002	15.60%	0.000	2.92%	0.01
Calentamiento Global² (kg CO2 eq)	126.796	125.66%	-27.790	-27.54%	1.901	1.88%	101.65
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.84E-07	21.82%	1.01E-06	77.36%	1.07E-08	0.82%	1.27E-06
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	1.06E-08	44.46%	1.31E-08	54.65%	2.12E-10	0.89%	2.35E-08
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.012	61.79%	0.007	35.99%	4.25E-04	2.22%	0.02
Smog (kg O3 eq)	5.453	81.51%	1.038	15.51%	0.199	2.98%	6.66

Tabla 11. Impactos potenciales durante el ciclo de vida del modelo 2 (Pavimento articulado).

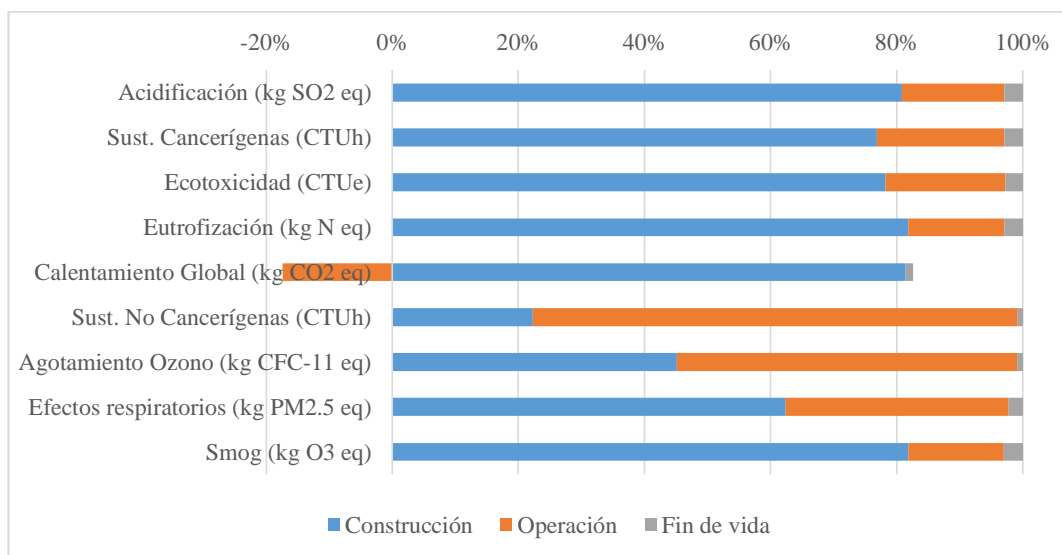


Figura 28. Incidencia por etapas en las categorías de impacto. Modelo 2. (Elaboración propia)

² En la etapa de operación se consideró que para el modelo 2, el “ahorro” en emisiones de CO2 equivalente debido al albedo de la superficie asfáltica es la diferencia entre ambos modelos que resulta una emisión negativa a la cual se le debe descontar el resto de emisiones correspondientes a la etapa de operación, de ahí el valor negativo que se muestra en los cuadros.

5. ANALISIS Y EVALUACION DE RESULTADOS

En la investigación realizada se hallaron los impactos potenciales de dos modelos de pavimentos urbanos típicos en la ciudad de Arequipa. Este tipo de vías tiene en la ciudad un amplio porcentaje por desarrollar y es crucial poder cuantificar el impacto resultado de este tipo de actividades. La información generada en este proyecto brinda un mejor entendimiento de la situación y ayuda a tomar decisiones correctas en materia ambiental.

En este capítulo se desarrollarán las comparaciones de los indicadores obtenidos para ambos modelos presentados en el capítulo anterior

5.1. COMPARACIÓN POR CATEGORÍA DE IMPACTO

5.1.1. Formación de Smog

Se hallaron los resultados para la formación de smog en ambos modelos. El pavimento flexible presenta valores mayores en la etapa de construcción, donde representa más del doble de las emisiones de ozono del pavimento articulado. Sin embargo, la figura se revierte en la etapa de operación, el pavimento articulado supera por 0.34 kilogramos de O₃ equivalente al pavimento flexible.

En el modelo 1 las principales causantes del resultado son, en orden de magnitud, las emisiones de la operación de maquinaria pesada (óxidos de nitrógeno), la colocación de la carpeta asfáltica (compuestos orgánicos volátiles) y el proceso de refinación (óxidos de nitrógeno), mientras que en el modelo 2 la principal causa es la operación de maquinaria pesada, seguida por la combustión adicional de hidrocarburos debido a la rugosidad durante la operación.



Figura 29. Formación de Smog. (Elaboración Propia)

5.1.2. Potencial de Calentamiento Global

Para el indicador de calentamiento global durante la construcción los adoquines de concreto superan en 53% las emisiones de CO₂ equivalente del pavimento flexible, debido a que el cemento es un material que genera grandes emisiones durante su producción siendo responsable de 74 kg de CO₂ equivalente del modelo 2. La siguiente actividad que origina el aumento del calentamiento global es la combustión durante el uso de maquinaria, que en el pavimento flexible representa más de la mitad de las emisiones durante el ciclo de vida.

Sin embargo, la cualidad reflectante de la superficie de concreto (albedo) permite una reducción del 21% de emisiones de CO₂ equivalente durante la etapa de operación que anula los efectos de la combustión adicional debido al mayor índice de rugosidad de este pavimento. En el fin de vida, se observa que el articulado tiene un impacto mayor, debido a que el volumen estimado de residuos (considerando solo la superficie de rodadura) es mucho mayor que su contraparte. Considerando la totalidad del ciclo de vida, el pavimento flexible genera 70.90 kilogramos de CO₂ equivalente, mientras que el pavimento articulado genera 101.65 kilogramos, existiendo una diferencia de 20% entre ambos modelos

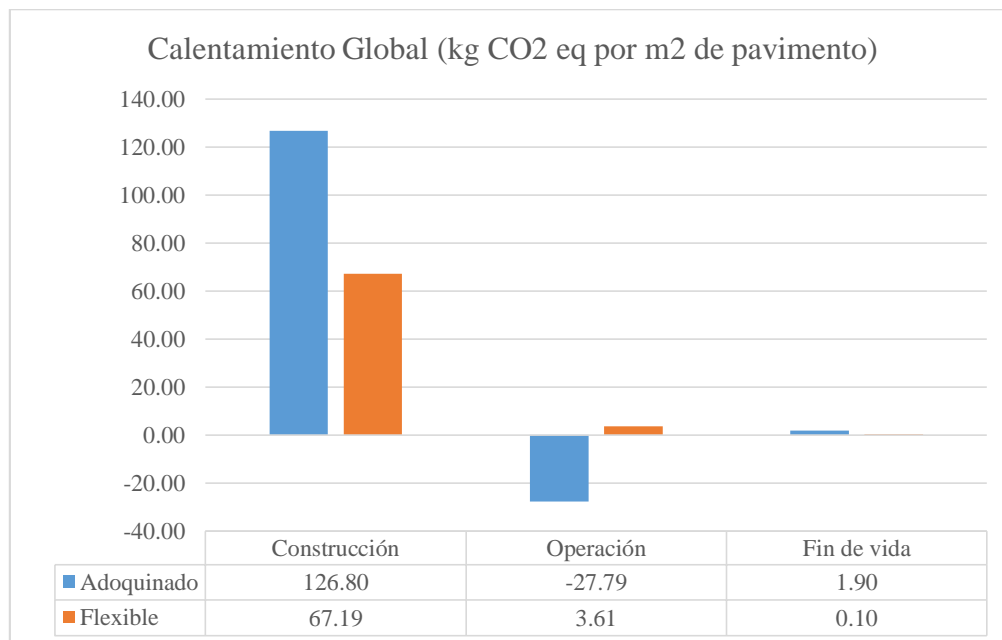


Figura 30. Potencial de Calentamiento global (Elaboración Propia)

5.1.3. Agotamiento de ozono estratosférico

En la categoría de agotamiento de ozono estratosférico los impactos de ambos modelos no son importantes, siendo el mayor valor 1.27×10^{-8} kg CFC-11 correspondiente a la etapa de operación del pavimento articulado. En todas las etapas del ciclo de vida el modelo 2 presenta una superioridad frente al modelo 1, con una diferencia de 70% y 25 % en las etapas de construcción y operación, respectivamente.

Los principales causantes de las emisiones equivalentes de CFC son el proceso de refinamiento para la obtención de combustibles líquidos como gasolina y diésel.

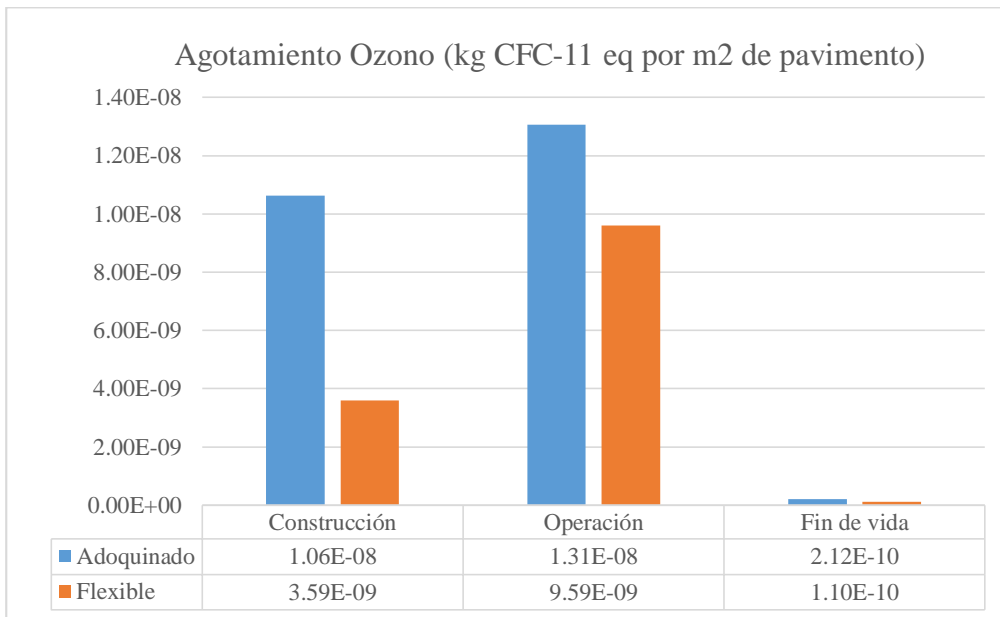


Figura 31. Agotamiento de Ozono. (Elaboración Propia)

5.1.4. Acidificación

La acidificación del medio en la etapa de construcción es considerablemente mayor en los pavimentos flexibles, existiendo una diferencia de 90% respecto del pavimento articulado. Esta diferencia se debe a la producción del bitumen para la carpeta asfáltica, que genera dióxido de sulfuro y óxidos de nitrógeno. En las etapas restantes no se observan mayores diferencias entre los modelos.

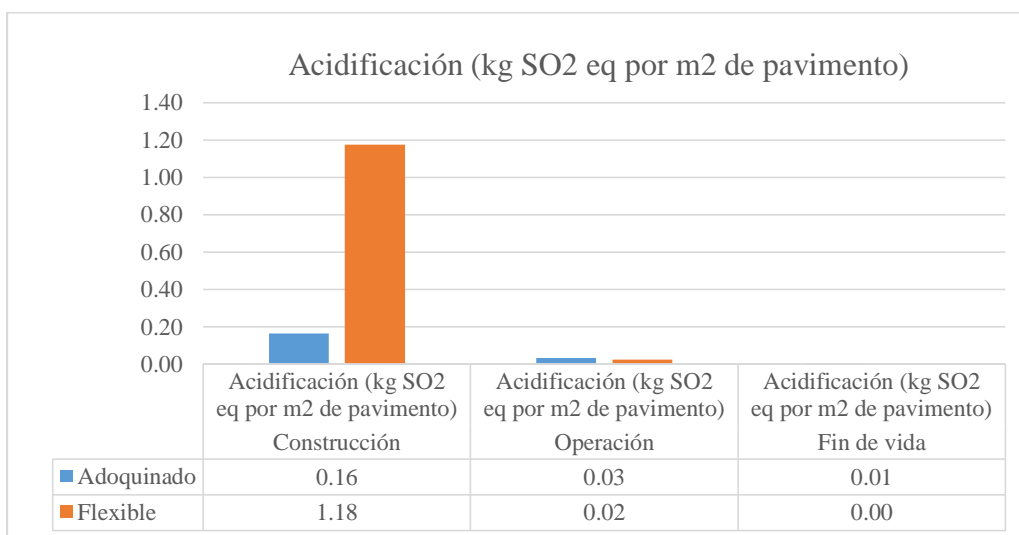


Figura 32. Acidificación. (Elaboración Propia)

5.1.5. Potencial de ecotoxicidad

Al igual que en el indicador de acidificación, en el caso de la eco toxicidad existe una gran diferencia en la etapa de construcción debido a la utilización de bitumen que genera en su producción descargas de iones de cromo, arsénico, plata, y cobre que contaminan los ecosistemas. La ecotoxicidad es una medida del estrés tóxico en el ambiente ocasionado por alguna sustancia y depende de su toxicidad inherente, del grado de exposición, la cantidad de sustancia y el número de eslabones del ecosistema afectados.

El pavimento asfáltico presenta 26 veces más potencial de eco toxicidad que el pavimento articulado durante la etapa de construcción, mientras que en las otras etapas los valores son similares y de una magnitud inferior.

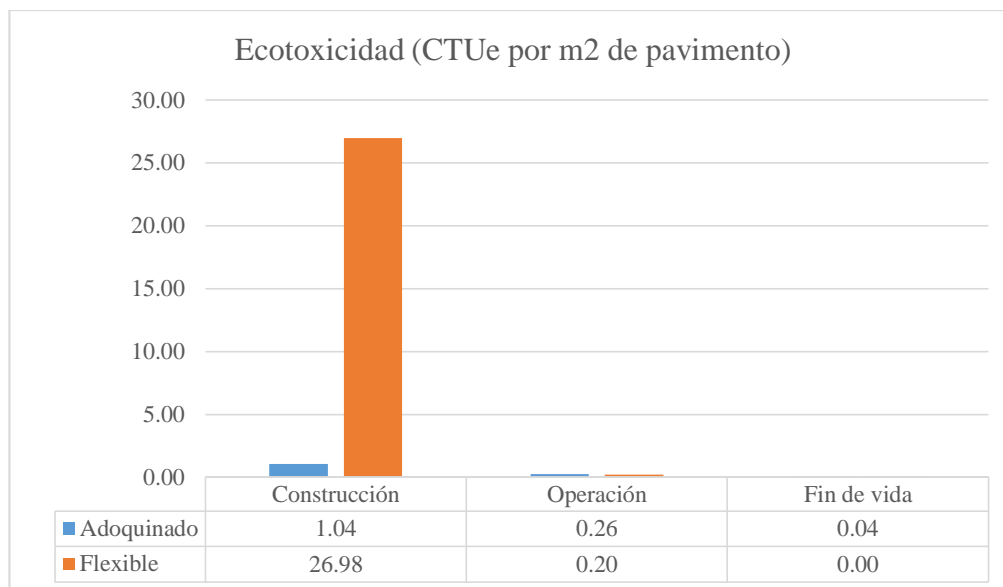


Figura 33. Eco toxicidad. (Elaboración Propia)

5.1.6. Eutrofización

La eutrofización, que es el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema acuático, posee mayor importancia en la etapa de construcción para ambos modelos, sin embargo, el modelo 1 presenta valores que cuadruplican el impacto generado por el modelo 2. En las etapas de operación y fin de vida los resultados obtenidos son similares para ambos modelos.

El nitrato, fósforo e iones de amonio generados en la refinación del crudo generan el 60% del potencial de eutrofización en el pavimento flexible, en cambio, en el caso de los adoquines, la eutrofización se origina por los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión de diésel en la maquinaria. Realizando una valoración en conjunto, se puede afirmar que los impactos en eutrofización son mínimos para ambos modelos estudiados.

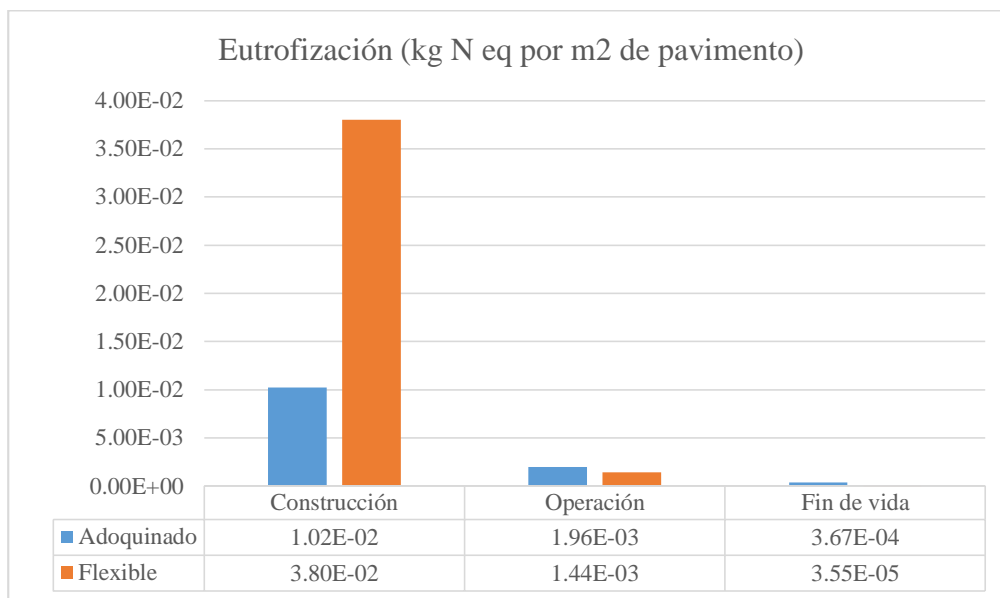


Figura 34. Eutrofización. (Elaboración Propia)

5.1.7. Criterios de Salud Humana

En la presente sección se han agrupado los criterios de salud humana. El primero de ellos corresponde a los efectos respiratorios que se miden en kilogramos equivalentes de material particulado menor a 2,5 micrómetros, PM_{2,5} y que representa el problema más grave. En la etapa de construcción el dióxido de azufre emitido en las refinerías representa el 75% de las emisiones del pavimento flexible seguido por la operación de maquinaria pesada. En el caso del pavimento de bloques de concreto se debe a la utilización de combustibles fósiles.

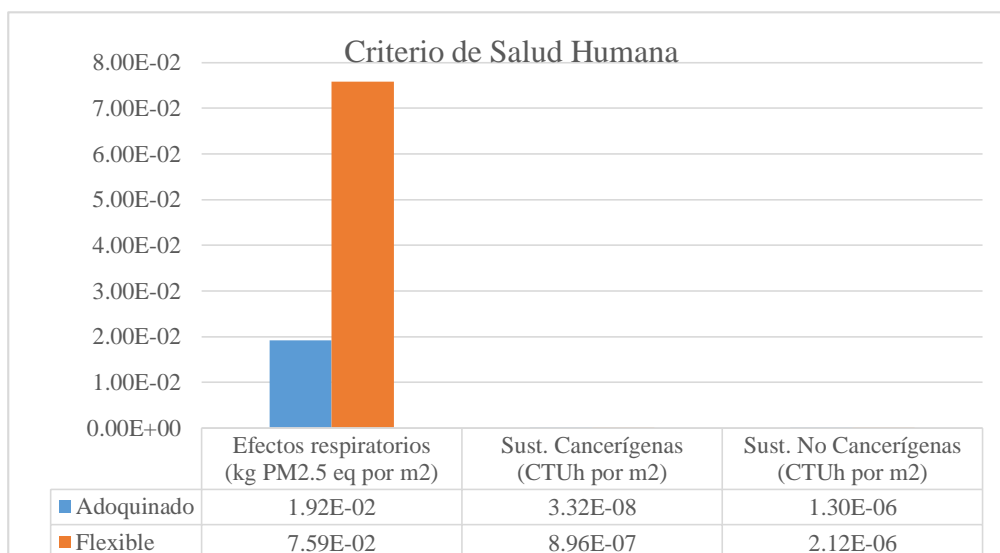


Figura 35. Criterios de salud humana. Sustancias Cancerígenas, no Cancerígenas y Efectos Respiratorios. (Elaboración Propia)

Se observa que los criterios correspondientes a sustancias cancerígenas están en el orden de 4.6×10^{-7} Casos de Enfermedad por kg. Emitido (CTUh), lo que significaría que si se pavimentaran 1000 kilómetros de vía existe la posibilidad de que se presenten 2.8 casos de cáncer como consecuencia de las emisiones de la actividad. El criterio de sustancias no cancerígenas presenta un promedio de 1.7×10^{-6} CTUh, es decir que por 1000 kilómetros pavimentados se presentarían 10 casos de enfermedades no cancerígenas.

El potencial de sustancias cancerígenas del pavimento flexible es 27 veces mayor que el potencial del articulado. De igual manera, el pavimento flexible posee un potencial de sustancias no cancerígenas 1.7 veces mayor que el articulado.

5.1.8. Resultados Globales

A continuación, en la tabla y el gráfico siguientes se muestra una comparación global para ambos modelos analizados, donde se aprecia que el pavimento flexible en frío posee mayores cargas ambientales que el pavimento articulado de concreto.

El modelo 2 (pavimento articulado) presenta mayores impactos que el modelo 1 (pavimento flexible) sólo en dos categorías, calentamiento global y agotamiento de ozono, considerando que esta última es la categoría con los valores más bajos de emisión. En la categoría de formación de smog, el pavimento flexible duplica el impacto generado por los adoquines, mientras que en los criterios de salud humana continua la predominancia del modelo 1.

La producción de bitumen significó que el pavimento asfáltico presente potenciales de impacto muy por encima de los originados por el pavimento de unidades de concreto en las categorías de eutrofización, acidificación y ecotoxicidad. Otras actividades que tiene gran influencia en todas las categorías de impacto es el uso de maquinaria pesada y el transporte de materiales a la ubicación del proyecto, que están ligadas a la combustión de diésel.

Categoría de Impacto	Modelo 1 (Pavimento flexible)	Modelo 2 (Pavimento articulado)
Calentamiento Global (kg C02 eq)	70.90	100.91
Smog (kg O3 eq)	14.09	6.69
Ecotoxicidad (CTUe)	27.18	1.34
Acidificación (kg S02 eq)	1.20	0.20
Eutrofización (kg N eq)	0.04	0.01
Efectos respiratorios (kg PM2,5 eq)	0.08	0.02
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.12E-06	1.30E-06
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.96E-07	3.32E-08
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	1.33E-08	2.39E-08

Tabla 12. Comparación entre Modelo 1 y 2 para las categorías TRACI 2.1

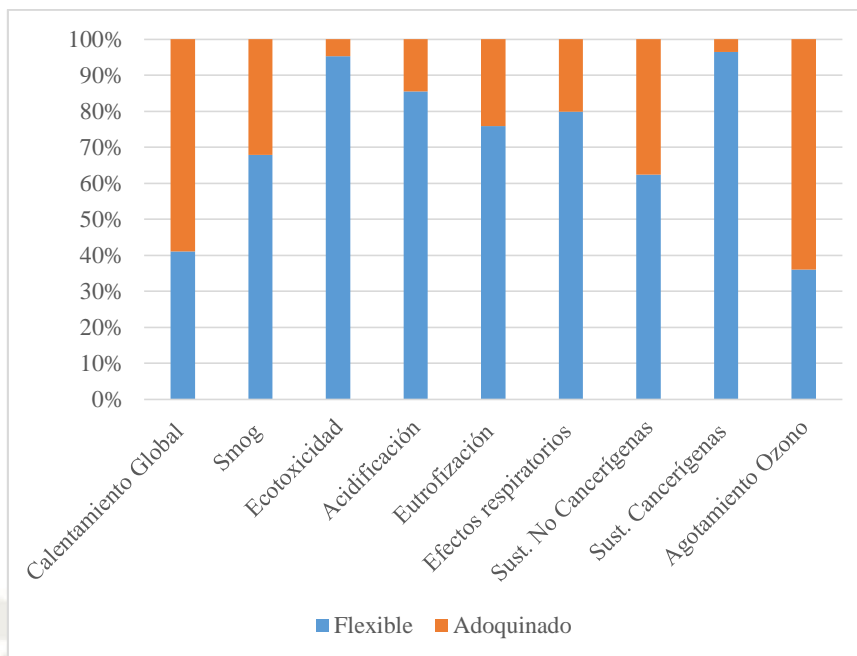


Figura 36. Comparación global entre Modelo 1 y 2 para las categorías TRACI 2.1. a lo largo del ciclo de vida. (Elaboración Propia)

La etapa de construcción es la que influye más en los resultados, representando el 90% de los impactos en 7 de las 9 categorías analizadas en el pavimento flexible, mientras que en el pavimento articulado representó alrededor del 80% en 6 de las 9 categorías.

5.2. COMPARACIÓN CON VARIACIÓN DE FACTORES

Para lograr una perspectiva más completa de los impactos ambientales generados por la pavimentación se analizaron dos escenarios en los que se modificaron factores como el mantenimiento de vías y el aumento del tráfico en las vías analizadas. El escenario 1 es el correspondiente a los resultados mostrados anteriormente, donde no se contemplaba ningún mantenimiento de vías y el índice medio diario (IMD) de vehículos era de 275 vehículos en promedio para el intervalo de tiempo analizado (20 años).

El segundo escenario analizado considera un mantenimiento de vías tal que el IRI de ambos pavimentos se mantenga alrededor de 2m/km, los demás factores como el albedo, las características de la vía y el número de vehículos se mantuvieron. El tercer escenario modelado presenta un IMDA de 2750 vehículos diarios y no existe ningún mantenimiento, es decir se mantienen los valores de IRI utilizados en el primer modelo y el cálculo del combustible adicional empleado en el escenario 1.

En los gráficos siguientes se observa que el mantenimiento de vías (escenario 2) no representa una mejora de magnitud considerable en los resultados del modelo, puesto que para ambos modelos en las categorías analizadas la reducción de impactos ambientales es de 2.3 % en promedio, exceptuando las sustancias no cancerígenas, donde se presentó una reducción del 46.8% y 8.58% en el pavimento articulado y flexible, respectivamente.

Categoría de Impacto	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Sin Mantenimiento		Con Mantenimiento		Sin Mantenimiento + Tráfico	
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	1.33E-08	11.05%	7.39E-09	6.14%	9.97E-08	82.81%
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.126E-06	18.78%	1.156E-06	10.20%	8.00E-06	71.02%
Smog (kg O3 eq)	14.09	28.88%	13.64	27.97%	21.04	43.15%
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.08	29.06%	0.07	28.04%	0.11	42.90%
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	70.90	29.22%	68.65	28.29%	103.08	42.48%
Eutrofización (kg N eq)	0.04	30.24%	0.04	29.60%	0.05	40.16%
Acidificación (kg SO2 eq)	1.20	31.50%	1.19	31.11%	1.43	37.39%
Ecotoxicidad (CTUe)	27.18	32.70%	27.05	32.55%	28.89	34.75%
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.96E-07	32.89%	8.92E-07	32.73%	9.36E-07	34.37%

Tabla 13. Impactos Ambientales en pavimento flexible para los escenarios analizados.

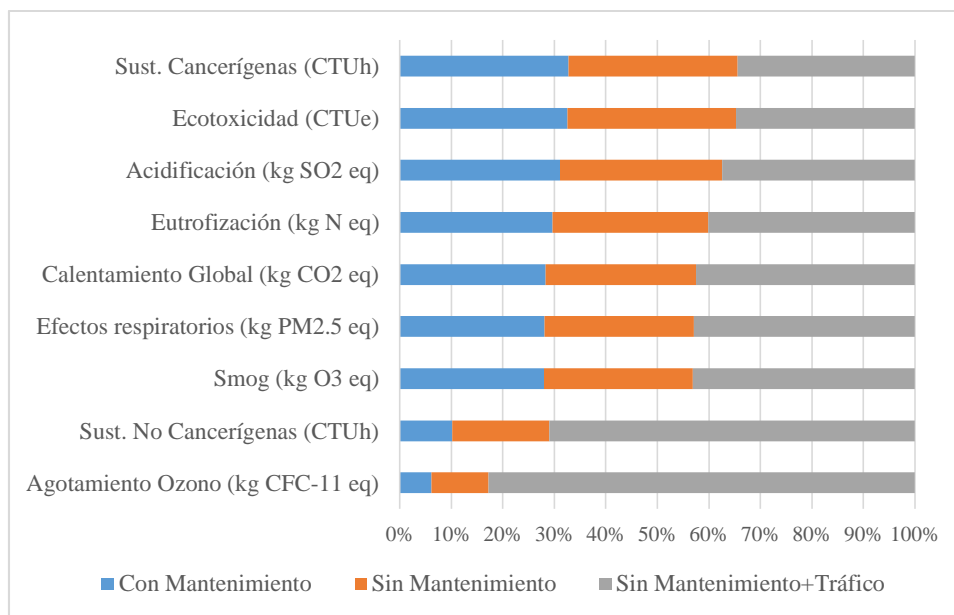


Figura 37. Impactos Ambientales en pavimento flexible para los escenarios analizados. (Elaboración propia)

Categoría de Impacto	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Sin Mantenimiento		Con Mantenimiento		Sin Mantenimiento + Tráfico	
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.02	5.69%	0.01	4.13%	0.30	90.19%
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	2.35E-08	13.36%	1.45E-08	8.24%	1.38E-07	78.40%
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.27E-06	17.83%	3.00E-07	4.21%	5.56E-06	77.96%
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	101.65	15.78%	98.18	15.24%	444.34	68.98%
Ecotoxicidad (CTUe)	1.33	22.54%	1.15	19.40%	3.44	58.06%
Smog (kg O3 eq)	6.66	26.61%	5.98	23.89%	12.39	49.50%
Eutrofización (kg N eq)	0.01	27.47%	0.01	24.61%	0.02	47.92%
Sust. Cancerígenas (CTUh)	3.30E-08	28.74%	2.73E-08	23.81%	5.45E-08	47.45%
Acidificación (kg SO2 eq)	0.20	28.40%	0.18	25.21%	0.33	46.38%

Tabla 14. Impactos ambientales para pavimento articulado en los escenarios analizados

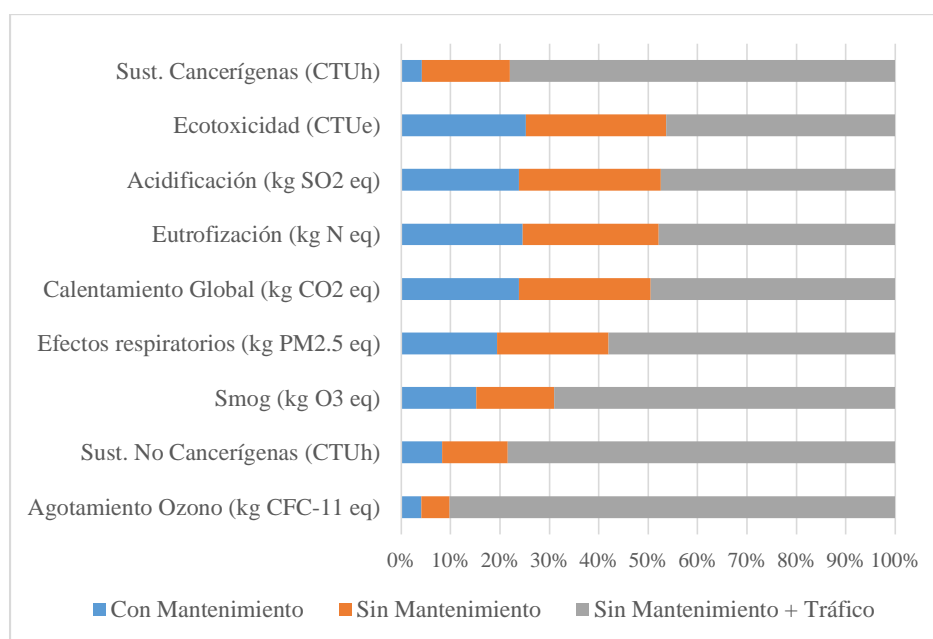


Figura 38. Impactos ambientales para pavimento articulado en los escenarios analizados. (Elaboración propia)

Sin embargo, si el IMDA aumentara y no existiese mantenimiento de vías (escenario 3), el modelo más afectado sería el pavimento articulado con un promedio de incremento de impactos de 344% para las categorías analizadas, mientras que en el pavimento flexible presenta un incremento promedio de 126%, como se refleja en las tablas siguientes.

FLEXIBLE			
<i>Categoría de Impacto</i>	<i>Escenario 1 Sin Mantenimiento</i>	<i>Escenario 3 Sin Mantenimiento + Tráfico</i>	<i>Variación (%)</i>
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	1.33E-08	9.97E-08	650%
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.11646E-06	8.00254E-06	278%
Smog (kg O3 eq)	14.09	21.04	49%
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.08	0.11	48%
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	70.90	103.08	45%
Eutrofización (kg N eq)	0.04	0.05	33%
Acidificación (kg SO2 eq)	1.20	1.43	19%
Ecotoxicidad (CTUe)	27.18	28.89	6%
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.9591E-07	9.36162E-07	4%
		Promedio	126%
ARTICULADO			
<i>Categoría de Impacto</i>	<i>Escenario 1 Sin Mantenimiento</i>	<i>Escenario 3 Sin Mantenimiento + Tráfico</i>	<i>Variación (%)</i>
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	2.35E-08	1.38E-07	487%
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.2725E-06	5.56248E-06	337%
Smog (kg O3 eq)	6.66	12.39	86%
Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.02	0.30	1486%
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	101.65	444.34	337%
Eutrofización (kg N eq)	0.01	0.02	74%
Acidificación (kg SO2 eq)	0.20	0.33	63%
Ecotoxicidad (CTUe)	1.33	3.44	158%
Sust. Cancerígenas (CTUh)	3.29975E-08	5.44877E-08	65%
		Promedio	344%

Tabla 15. Variación de impacto entre los escenarios 1 y 3 para ambos modelos.

De la tabla 15, que compara los resultados obtenidos por ambos modelos en el escenario 3, resaltan las categorías de efectos respiratorios con 0.3 kg PM2.5 eq por m2 para el pavimento articulado que triplica los resultados de la carpeta asfáltica y el potencial de calentamiento global, donde el pavimento articulado genera cuatro veces más impactos que el pavimento flexible. Los resultados mostrados son mayores para el pavimento flexible debido a que con el paso del tiempo su IRI se incrementa produciendo mayor combustión de hidrocarburos en los vehículos que circulan.

<i>Categoría de Impacto</i>	<i>P. FLEXIBLE</i>	<i>P. ARTICULADO</i>	<i>VARIACIÓN</i>
<i>Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)</i>	9.97E-08	1.38E-07	39%
<i>Sust. No Cancerígenas (CTUh)</i>	8.00E-06	5.56E-06	-30%
<i>Smog (kg O3 eq)</i>	21.04	12.39	-41%
<i>Efectos respiratorios (kg PM2.5 eq)</i>	0.11	0.30	169%
<i>Calentamiento Global (kg CO2 eq)</i>	103.08	444.34	331%
<i>Eutrofización (kg N eq)</i>	0.05	0.02	-58%
<i>Acidificación (kg SO2 eq)</i>	1.43	0.33	-77%
<i>Ecotoxicidad (CTUe)</i>	28.89	3.44	-88%
<i>Sust. Cancerígenas (CTUh)</i>	9.36E-07	5.45E-08	-94%

Tabla 16. Comparación de los resultados para el escenario 3 (Vías sin mantenimiento y tráfico) para ambos modelos.

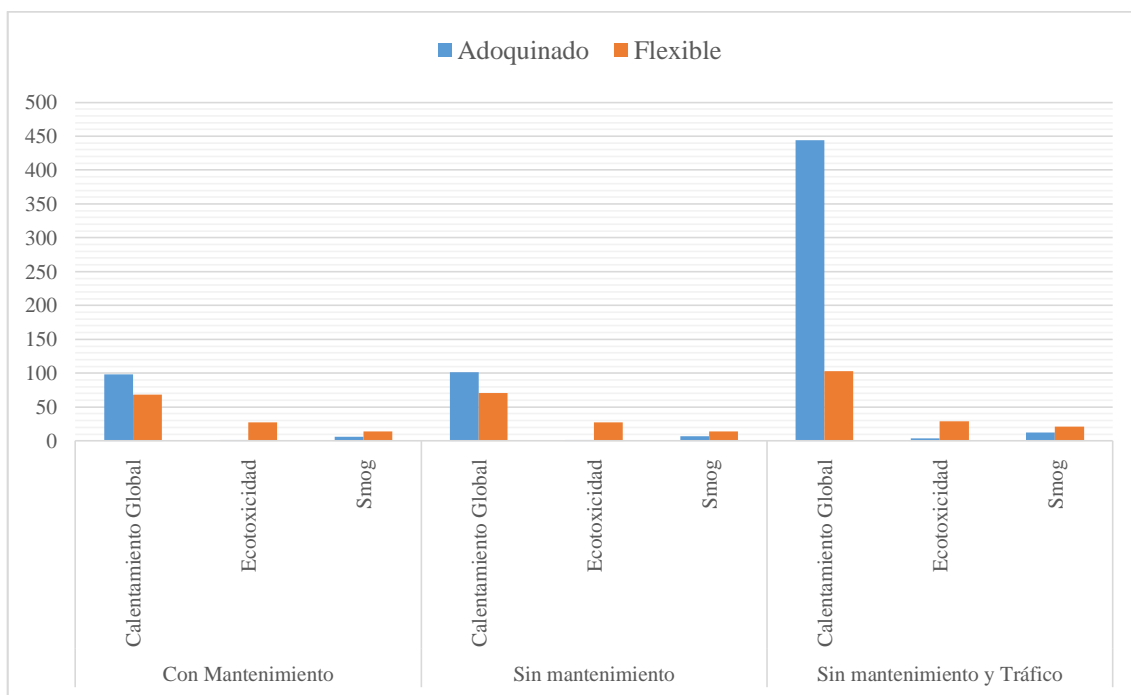


Figura 39. Comparación de escenarios para categorías representativas. (Elaboración propia)

Según la metodología utilizada por el MTC en su Manual de Diseño Geométrico, basado en “Highway Capacity Manual 2010”, se establecen capacidades vehiculares de acuerdo a niveles de servicio. Se utilizaron estos niveles de servicio para determinar el máximo flujo de vehículos en la vía analizada, manteniendo los 80 km/h con los que se calculó el IRI y el gasto de combustible debido a rugosidad.

El nivel de servicio límite para las condiciones descritas es el “D” para vías de dos carriles, en las que el flujo es cercano a la inestabilidad pero se puede mantener la velocidad de 80 km/h, lográndose un flujo horario de 1800 vehículos/hora en ambos carriles, 900 vehículos/hora por carril (Dirección Nacional de Vialidad - Argentina, n.d.). Considerando que el flujo horario es 0.12 el flujo diario (MTC, 2013), se calculó un IMDA de 7500 vehículos como capacidad máxima de la vía.

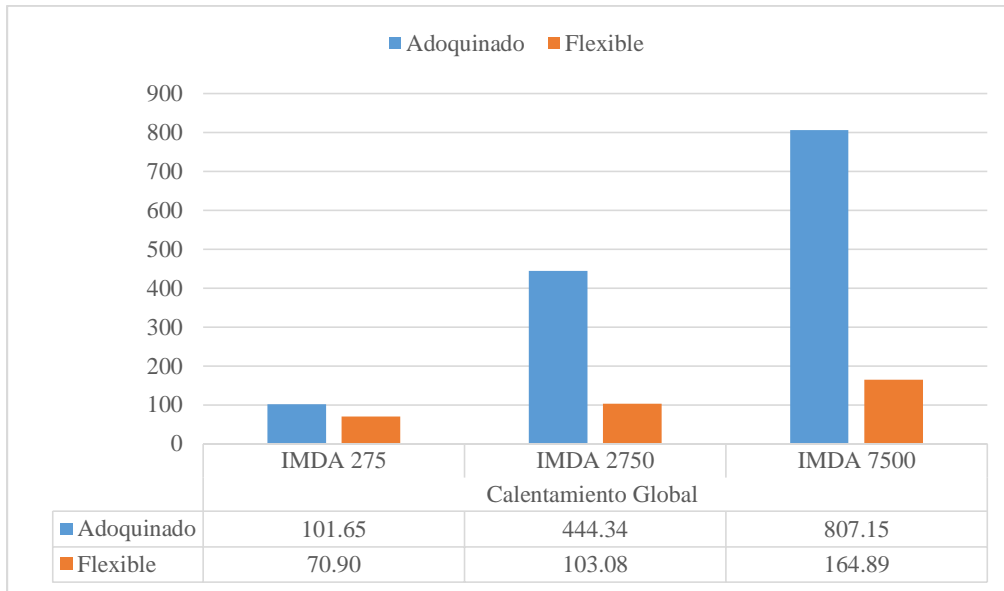


Tabla 17. Resultados para categoría de calentamiento global para diferentes IMDA, donde 7500 es la capacidad máxima.

De la gráfica mostrada anteriormente se obtiene que las emisiones tienen un crecimiento lineal de 9.76% para el pavimento articulado y 1.72% para el pavimento flexible. El análisis se realizó solo hasta un nivel de servicio “D” ya que en niveles inferiores (“E” y “F”) el flujo vehicular se vuelve imprevisible, variando del máximo a cero debido al tráfico.

Impact category	Amount
Non carcinogenics - TRACI 2.1	0.00653
Smog - TRACI 2.1	0.00555
Acidification - TRACI 2.1	0.00275
Respiratory effects - TRACI 2.1	0.00166
Global warming - TRACI 2.1	0.00148
Carcinogenics - TRACI 2.1	0.00087
Eutrophication - TRACI 2.1	0.00067
Ecotoxicity - TRACI 2.1	0.00017
Ozone depletion - TRACI 2.1	5.95040E-7

Impact category	Amount
Non carcinogenics - TRACI 2.1	0.00653
Smog - TRACI 2.1	0.00555
Acidification - TRACI 2.1	0.00275
Respiratory effects - TRACI 2.1	0.00166
Global warming - TRACI 2.1	0.00148
Carcinogenics - TRACI 2.1	0.00087
Eutrophication - TRACI 2.1	0.00067
Ecotoxicity - TRACI 2.1	0.00017
Ozone depletion - TRACI 2.1	5.95040E-7










Impact category	Amount
 Carcinogenics - TRACI 2.1	0.01699
 Acidification - TRACI 2.1	0.01322
 Smog - TRACI 2.1	0.01012
 Respiratory effects - TRACI 2.1	0.00313
 Global warming - TRACI 2.1	0.00293
 Ecotoxicity - TRACI 2.1	0.00246
 Non carcinogenics - TRACI 2.1	0.00202
 Eutrophication - TRACI 2.1	0.00183
 Ozone depletion - TRACI 2.1	8.24402E-8

Figura 40. Factores de ponderación para los análisis con IMDA 275,2750 y 7500 respectivamente

Además, el software brinda unos valores de ponderación mostrados en las imágenes anteriores a través de los cuales se puede obtener un resultado global aproximado del nivel de impactos causado por cada modelo. Es así que se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas siguientes, donde se observa que para un tránsito de 275 vehículos diarios los impactos de ambos modelos son similares, aunque el flexible es ligeramente superior. Sin embargo, con el incremento de IMDA a 2750 y 7500 respectivamente, el pavimento articulado posee mayores implicancias ambientales.

Categoría de Impacto	IMDA=275 (ESCENARIO BASE)				
	Flexible	Adoquín	Factor de Ponderación	Flexible	Adoquín
Acidificación	1.20	0.20	0.00275	0.00330202	0.00056
Sust. Cancerígenas	9.0E-07	3.3E-08	8.7E-04	7.8E-10	2.9E-11
Ecotoxicidad	27.18	1.33	0.00017	0.0046204	0.00023
Eutrofización	0.04	0.01	0.00067	2.6463E-05	8.38656E-06
Calentamiento Global	70.90	101.65	0.00148	0.10493438	0.15044
Sust. No Cancerígenas	2.1E-06	1.3E-06	6.5E-03	1.4E-08	8.3E-09
Agotamiento Ozono	1.3E-08	2.4E-08	6.0E-07	7.9E-15	1.4E-14
Efectos respiratorios	0.076	0.019	0.002	0.000	0.000
Smog	14.09	6.66	0.006	0.078	0.037
TOTAL				0.211	0.188
Categoría de Impacto	IMDA=2750 (ESCENARIO 3)				
	Flexible	Adoquín	Factor de Ponderación	Flexible	Adoquín
Acidificación	1.43	0.33	0.00224	0.00319296	0.00074
Sust. Cancerígenas	9.4E-07	5.4E-08	6.3E-04	5.9E-10	3.4E-11
Ecotoxicidad	28.89	3.44	0.00012	0.00346624	0.00041
Eutrofización	0.05	0.02	0.00058	3.042E-05	1.2665E-05
Calentamiento Global	103.08	444.34	0.0042	0.43294655	1.86621
Sust. No Cancerígenas	8.0E-06	5.1E-07	1.2E-03	9.7E-09	6.1E-10
Agotamiento Ozono	1.0E-07	1.4E-07	1.5E-07	1.5E-14	2.0E-14
Efectos respiratorios	0.112	0.301	0.001	0.000	0.000
Smog	21.04	12.39	0.005	0.101	0.059
TOTAL				0.541	1.677

Categoría de Impacto	IMDA=7500 (CAPACIDAD MAXIMA)				
	Flexible	Adoquín	Factor de Ponderación	Flexible	Adoquín
Acidificación	1.86	0.61	0.01322	0.0245417	0.00809
Sust. Cancerígenas	1.0E-06	1.0E-07	1.7E-02	1.7E-08	1.8E-09
Ecotoxicidad	32.17	7.51	0.00246	0.07913925	0.01847
Eutrofización	0.08	0.04	0.00183	0.00014145	7.54452E-05
Calentamiento Global	164.89	807.15	0.00293	0.48313204	2.36495
Sust. No Cancerígenas	2.0E-05	8.7E-07	2.0E-03	4.0E-08	1.8E-09
Agotamiento Ozono	2.7E-07	3.6E-07	8.2E-08	2.2E-14	3.0E-14
Efectos respiratorios	0.182	0.800	0.003	0.001	0.003
Smog	34.39	24.04	0.010	0.348	0.243
	TOTAL			0.936	2.637

Tabla 18. Resultados de los análisis con IMDA 275,2750 y 7500 respectivamente

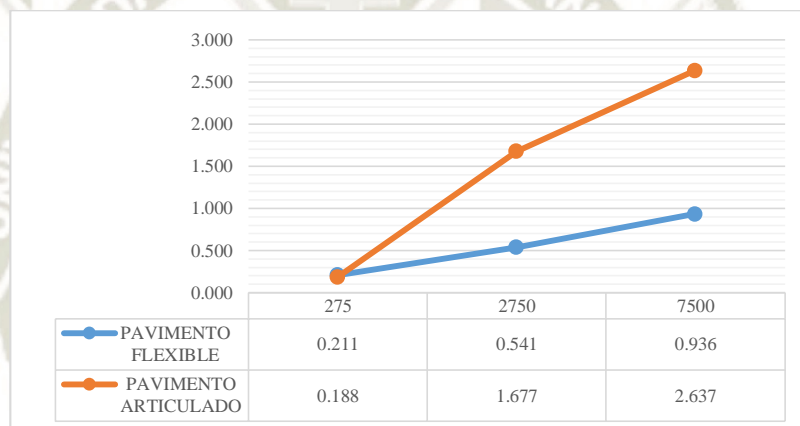


Figura 41. Resultados de los análisis con IMDA 275,2750 y 7500 respectivamente

Analizando ambos gráficos se nota un punto de intersección entre las dos rectas que corresponde a un IMDA de 325 vehículos que es el límite después del cual el pavimento articulado genera mayor impacto ambiental que el flexible.

Una de las herramientas de control ambiental de la legislación peruana son los estándares de calidad ambiental (ECA), a continuación, se hace una comparación aproximada entre las emisiones obtenidas del inventario del ciclo de vida de los pavimentos analizados y los estándares mencionados.

La comparación da una idea general del nivel de emisiones obtenidas, pero no es un dato exacto debido a que los ECAS son medidas puntuales de los contaminantes en el ambiente y los resultados obtenidos son la suma global durante la vida de los pavimentos.

	ECA		Modelo 2 Articulado	Modelo 1 Asfaltado
	ug/m3		ug/m3	ug/m3
Dióxido de azufre	80	Media aritmética anual	36.64243	52.70872
PM-10	50	Media aritmética anual	40.97509	46.3869
Monóxido de Carbono	30000	No exceder más de una vez al año	428.4345	541.1804
Dióxido de nitrógeno	1000	Media aritmética anual	134.5309	186.0308
Plomo	1.25	No exceder más de 4 veces al año	0.56373	3.664243

Tabla 19. Comparación entre ECAs para aire y resultados obtenidos



CONCLUSIONES

Para ambos modelos la etapa de construcción representó la mayor fuente de cargas ambientales, en el caso del pavimento flexible dicha etapa significó en promedio el 85% de las emisiones y 75% para el pavimento articulado. De igual manera, sólo las categorías de agotamiento de ozono y sustancias no cancerígenas, ambas con cantidades mínimas, presentan emisiones mayores durante la operación. El fin de vida, sin considerar algún reciclaje o reúso, no logra un porcentaje mayor al 3% del total de los impactos generados durante el ciclo de vida en ambos modelos de pavimentación.

De los resultados obtenidos, el calentamiento global fue la categoría con los mayores impactos para ambos modelos, donde el pavimento de adoquines de concreto posee 1.4 veces más potencial de emisiones de CO₂ que el pavimento flexible, siendo la etapa de operación la que más influencia tuvo en los resultados por lo que se debe ampliar los estudios respecto a la evolución del IRI en pavimentos urbanos, especialmente en los articulados para poder llegar a una conclusión más exacta.

Por otro lado, el pavimento flexible superó las emisiones de su análogo en siete de las nueve categorías analizadas, generando el doble de emisiones de smog, casi 6 veces más potencial de acidificación y 20 veces el potencial de ecotoxicidad del pavimento articulado. Los resultados fueron reflejo de las emisiones causadas por la producción del bitumen y querosene y del proceso de colocación de la carpeta asfáltica.

En cuanto a los criterios de salud humana, los resultados fueron mínimos, donde el pavimento flexible superó al articulado en las tres categorías correspondientes. Las actividades en la refinería, necesarias para la producción de bitumen y la colocación de la carpeta asfáltica fueron causas directas por las que este tipo de pavimentación generó impactos mayores en cuatro categorías ambientales (Acidificación, ecotoxicidad, eutrofización y sustancias cancerígenas). Sin embargo, la actividad que tienen relación con todos los impactos analizados es la combustión de hidrocarburos, diésel o gasolinas, durante la construcción (transporte de materiales y operación de maquinaria), operación (circulación de vehículos) y fin de vida (transporte de escombros).

Para lograr un mejor entendimiento se modificó el modelo presentado, variando el índice de rugosidad (IRI) y el índice medio diario de vehículos (IMDA). En uno de los escenarios modelados se consideró que, al existir mantenimiento de vías, el IRI inicial se mantendría similar a lo largo del tiempo, lo que significó reducciones de tan sólo 3% en las categorías de impacto con relación al modelo que no consideraba mantenimiento alguno. Como resultado los impactos mantuvieron las relaciones existentes en el modelo base, donde el calentamiento global era mayor en el articulado, pero el pavimento flexible superaba ampliamente en el resto de categorías.

Sin embargo, en el siguiente escenario se consideró el aumento del IMD, de 275 a 2750 vehículos diarios, sin considerar mantenimiento de vías. El pavimento más afectado en este caso fue el modelo de adoquines, cuyo potencial de calentamiento global se elevó hasta superar en 4.4 veces el potencial del pavimento flexible, de donde

se desprende que el pavimento articulado no es la opción más adecuada para alto tránsito debido a que la falta de mantenimiento y el consecuente incremento en el IRI unido a un volumen de tránsito mayor incrementa rápidamente las emisiones por combustión de hidrocarburos. De los resultados de la ponderación se obtiene que el pavimento articulado tiene menor impacto hasta un tráfico de 325 vehículos diarios, después de los cuales es preferible usar pavimentos flexibles. Se debe enfatizar que estos son los resultados de una primera investigación con modelos aproximados que debe de ser respaldada por estudios que se deben llevar a cabo a lo largo de la vida útil de ambos modelos.

El límite de análisis establecido para el cálculo de los impactos ambientales fue el nivel de servicio “D”, con una capacidad máxima de 7500 vehículos diarios desplazándose a 80 km/h. En este escenario límite se mantienen las relaciones en la categoría más relevante, calentamiento global. Es así que el pavimento articulado incrementa con una tasa del 9.76% mientras que el pavimento flexible incrementa a razón de 1.72%. Se estableció este límite puesto que al incrementarse el tránsito por encima de la capacidad máxima el flujo se vuelve impredecible y su análisis se complica.

Otra conclusión importante es la importancia del índice de rugosidad en el desempeño ambiental de los sistemas de pavimentación urbana. Un incremento desmedido de dicho factor implicaría grandes aumentos en los impactos ambientales generados por los dos sistemas estudiados. Factores inherentes a las vías urbanas como reparaciones consecuencia de conexiones a la red de saneamiento, buzones, rompemuelles, entre otros deben ser investigados ya que, a la luz de los resultados obtenidos podrían significar un incremento desmedido en las emisiones ambientales.

Por último, al realizar una comparación aproximada de las emisiones obtenidas durante el ciclo de vida de los pavimentos y los estándares de calidad ambiental para el aire dados por la legislación peruana se observa que, en promedio, las emisiones de ambos tipos de pavimentos no superan los estándares de calidad establecidos, aunque como se esperaba el pavimento asfáltico obtuvo resultados mayores al pavimento articulado.

RECOMENDACIONES

Los pavimentos urbanos en la ciudad de Arequipa deben realizarse teniendo en cuenta el desempeño ambiental en relación a la carga vehicular que soportaran. De acuerdo a los resultados analizados en la presente investigación los pavimentos articulados de concreto son la opción más idónea en vías con bajo índice de tránsito, sin embargo, su eficiencia se ve afectada por dos factores el aumento del volumen vehicular y del índice de rugosidad, generando grandes emisiones de CO₂ y requiriendo un mantenimiento constante.

Ya que la construcción es la etapa en donde existen mayores impactos y las actividades que conllevan el uso de combustibles fósiles tienen influencia en todas las categorías de impacto, se debe utilizar una estrategia de reducción de combustibles a lo largo del procedimiento constructivo, considerando acciones a corto y largo plazo, como por ejemplo tomar en cuenta las distancias de transporte, mejorar los rendimientos de la maquinaria pesada e invertir en la compra de equipos más eficientes, que reducirán las emisiones y permitirán un ahorro monetario en combustible.

Como se mencionó, la norma peruana de pavimentos urbanos CE 0.10 no menciona ningún método para determinar la rehabilitación de las vías urbanas, dejándolas a criterio de las autoridades municipales. Por lo tanto, deben realizarse estudios orientados al establecimiento de un sistema eficiente de gestión de infraestructura vial con guías de procedimiento para la evaluación y posterior rehabilitación de vías. Así se obtendrá información acerca del estado de los pavimentos, de sus ciclos de mantenimiento y de los impactos ambientales relacionados a estas actividades y por ende los índices de serviciabilidad de las vías en la ciudad mejorarán. Un método ampliamente utilizado para determinar si las condiciones de las vías son adecuadas es el índice de rugosidad internacional, para el cual existen diversos métodos de medición que se adaptan al contexto de la locación y por las conclusiones obtenidas en esta investigación son un punto importante de partida.

Por último, en vista de que la producción de cemento y asfalto es responsable de un gran porcentaje de los impactos, se requiere que los productores de las materias de construcción con alta demanda energética, brinden información clara y precisa acerca del uso de recursos y de las emisiones generadas durante sus actividades. Actualmente en el país no existe información directa de los fabricantes y las estimaciones podrían no representar a cabalidad la realidad. Además, las empresas constructoras y contratistas también deberían realizar un informe de los gastos de recursos en los que incurren durante la realización de los proyectos, que incluyan la cantidad de energía eléctrica, combustibles y agua utilizados, para poder desarrollar bases de datos y modelos que representen adecuadamente las condiciones de la ciudad de Arequipa y que permitan disminuir los impactos ambientales de la construcción de infraestructura vial.

BIBLIOGRAFÍA

- Akbari, H., Damon Matthews, H., & Seto, D. (2012). The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 7(2).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024004>
- Ambiente, C. N. de M. (2001). *Guía Metodológica Estudio de Ciclo de Vida*. Santiago de Chile.
- Banco Mundial. (2014). Emisiones de CO2 (kt) | Peru. Retrieved February 19, 2018, from https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?locations=PE&year_high_desc=true
- Cáceres Cebrecos, A. L. (2016). *Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Retrieved from <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6682>
- Concepcion, M. (2014). *Estrategia nacional para combustibles y vehiculos mas limpios en el Perú*. Lima Perú.
- Curran, M. A. (2012). *Life cycle assessment handbook a guide for enviornmentally sustainable products*. Scrivener/Wiley.
- Dirección Nacional de Vialidad - Argentina. (n.d.). Capacidad y Nivel de Servicio. Retrieved December 10, 2018, from http://transito.vialidad.gov.ar:8080/web_ns/index.jsp
- Estrella Suárez, M. V., & González Vázquez, A. (n.d.). *Desarrollo sustentable : un nuevo mañana*.
- FICEM. (n.d.). Reporte de Sostenibilidad para la Industria del Cemento -Federación Interamericana del Cemento. Retrieved from http://www.ficem.org/pres/PRESENTACION_REPORTE_CONSOLIDADO_SOSTENIBILIDAD.pdf
- Gregory, J. (2017). Pavement-related research at the MIT Concrete Sustainability Hub. Retrieved from <https://cshub.mit.edu/pavements>
- Häkkinen, T., & Mäkelä, K. (1996). *Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI. (2012). Retrieved February 19, 2018, from <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- ISO 14040. Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework (2006). Brussels, Belgium.
- ISO 14044. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, Environmental Management § (2006). Brussels, Belgium.
<https://doi.org/10.1136/bmj.332.7555.1418>
- Jane Bare. (2014). Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI) TRACI version 2.1 User's Guide. *US EPA Office of Research and Development, EPA/600/R(12)*, 554.
<https://doi.org/10.2113/gselements.7.3.181>
- Keoleian, G.A., and Menerey, D. (1993). Life Cycle Design Guidance Manual. *Epa/600/R-*

- 92/226. University of Michigan. Retrieved from http://css.snre.umich.edu/css_doc/CSS93-02.pdf
- Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., & Menzies, G. F. (2009). Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. *Sustainability*, 1(3), 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>
- Minem. Decreto Supremo N° 074-2001-Pcm Reglamento De Estandares Nacionales De Calidad Ambiental Del Aire (2001). <https://doi.org/D.S N° 074 - 2001 -PCM>
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos*. Universidad Católica de Colombia. <https://doi.org/9789589761786> 9789589761793 9789589784006
- MTC, O. de E. del. (2016). *Anuario Estadístico 2016*. Lima. Retrieved from http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/publicaciones/anuarios/ANUARIO_ESTADISTICO_O_2016.pdf
- MTC, Viceministerio de, & Ferrocarriles y Dirección General de Caminos y Transporte. Diseño Geométrico DG-2018 (2018). Retrieved from http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Noi, C. Di, Ciroth, A., & Srocka, M. (2017). openLCA 1.7, Comprehensive User Manual, (v. 1.1).
- Norma CE.010. (2010). Pavimentos Urbanos. In *Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO Gerencia de Investigación y Normalización* (Primera Ed). Lima Perú.
- Organización Mundial de la Salud. (n.d.). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Retrieved September 20, 2018, from [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones. Retrieved from <https://books.google.com.au/books?id=zuwcDgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- Swei, O., Xu, X., Noshadravan, A., Wildnauer, M., Gregory, J., & Kirchain, R. (2014). Supplementary Information for Comparative Pavement Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis. *Massachusetts Institute of Technology - Concrete Sustainability Hub*, (April 2014), 1–379. Retrieved from <http://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/Supplementary Information V2.pdf>
- Tamayo, J., Jácome, J., Vázquez Arturo, & De la Cruz, R. (ed. . (2015). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al desarrollo del país*.
- Vaca, C. A. M. (2015). *Aplicación de teléfonos inteligentes para determinar la rugosidad de pavimentos urbanos en Lima*. Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- Vargas, P. (2009). El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú. *Banco Central de Reserva Del Perú*, 1, 59. Retrieved from <http://sinia.minam.gob.pe/modsinia/public/docs/1745.pdf>

ANEXO 1: CONSIDERACIONES PARA PAVIMENTO FLEXIBLE

Área: 7631.71 m²
Longitud: 665 m
Tiempo de ejecución: 1 mes

	Proceso	Flujo de referencia	Input	Cantidad (por m ²)	Unidad
1	Demolición de pavimento existente	Vía sin pavimentación	Ocupación del sitio	0.083	m ² * año
		m ²	Escombros de pavimento existente	0.126	tn
			Transporte de escombros a botadero (6 km)	0.758	tnxkm
			Cargador sobre llantas 160-195 HP 3.5 yd ³	0.010	hm
2	Instalación de base	Base granular	Camión cisterna inc. Motobomba (2,500 glns).	0.062	hm
		m ²	Mini cargador, 53.8 kw, 818 kg	0.002	hm
			Motoniveladora de 130-135 hp	0.062	hm
			Rodillo liso vibrador 120-150-hp 10 tn	0.022	hm
			Camión volquete 15 m ³ .	0.011	hm
			Cargador sobre llantas 160-195 hp 3.5 yd ³	0.123	hm
			Zaranda mecánica	0.053	hm
			Materiales selectos en cantera para base (arena)	0.550	m ³
			piedra chancada en cantera para base (piedra chancada)	0.650	m ³
			Excavación en cantera de material para base y subbase	17.472	ton
			Transporte de material desde cantera	17.472	tnxkm
			Agua para compactación	0.055	m ³
3	Instalación de carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica	Pavimentadora	0.027	hm
		m ²	Rodillo neumático autop.81-110 hp 5.5-20tn	0.035	hm
			Rodillo liso vibr autop 70-100 hp 7-9 t.	0.032	hm
			Cargador s/llantas 100-110 hp 2 - 2.5 yd ³ .	0.032	hm
			Compresora neumatica de 87 hp	0.003	hm
			Volquete 15 m ³	0.011	hm
			Camión imprimador de 800 gal	0.003	hm

			Piedra para mezcla asfáltico tnm 3/4"	0.070	m3
			Arena gruesa	0.050	m3
			Excavación en cantera de material para base y Subbase	0.206	tn
			Filler	0.030	tn
			Transporte de agregado	1.416	tnxkm
			Mezcla asfáltica RC-250	1.020	gal
			Kerosene industrial	0.080	gal
4	Demolición de pavimento existente	Carpeta asfáltica	Escombros	0.2060	tn
		m2	Transporte de escombros a botadero (6 km)	1.2360	tnxkm
			Cargador sobre llantas 160- 195 HP 3.5 yd3	0.7584	hm



ANEXO 2: CONSIDERACIONES PARA PAVIMENTO ARTICULADO DE CONCRETO

Longitud: 1573 m
Área: 9107.4 m²
Tiempo de ejecución: 40 días

	Proceso	Flujo de referencia	Input	Cantidad (por m ²)	Unidad	
1	Demolición de pavimento existente	Vía sin pavimentación	Ocupación del sitio	0.083	m ² * año	
		m ²	Escombros de pavimento existente	0.060	tn	
			Transporte de escombros a botadero (6 km)	0.361	tnxkm	
2	Instalación de base	Base granular	Cargador sobre llantas 160-195 HP 3.5 yd ³	0.015	hm	
			Camión cisterna inc. motobomba (2,500 glns).	0.062	hm	
			m ²	Minicargador, 53.8 kw, 818 kg	0.002	hm
				Motoniveladora de 130-135 hp	0.062	hm
				Rodillo liso vibrador 120-150-hp 10 tn	0.022	hm
				Camión volquete 15 m ³ .	0.015	hm
				Cargador sobre llantas 160-195 hp 3.5 yd ³	0.123	hm
				Zaranda mecánica	0.053	hm
				Transporte de material desde cantera	23.040	tnxkm
				Excavación en cantera de material para base y subbase	23.040	ton
				Materiales selectos en cantera para base (arena)	0.550	m ³
				Piedra chancada en cantera para base (piedra chancada)	0.650	m ³
				Agua	0.055	m ³
3	Colocacion de pav. Articulado	Articulado	Arena (pe=1.6 tm/m ³)	0.086	m ³	
		m ²	Piedra chancada de 1/2" - 3/4"	0.000	m ³	
			Hormigón (grava)	0.014	m ³	
			Extracción de material en cantera	0.146	tn	
			Transporte agregado	1.755	tnxkm	
			Alambre negro recocado n°8	0.002	kg	
			Petróleo d-2	0.000	gln	
	Agua	0.002	m ³			

			Adoquines (50 un por m2)	0.175	tn
			Cemento portland tipo i (42.5kg)	0.001	tn
			Concreto prefabricado para sardinel tipo burbuja	0.022	tn
			Transporte cemento, adoquines y sardineles prefabricados	1.678	tnxkm
			Cargador sobre llantas 160-195 hp 3.5 yd3 (extendido)	0.010	hm
			Montacargas 2.5-3 tn	0.080	hm
			Cortadora circular de concreto	0.042	hm
			Compactadora vibrat. de plancha 7 hp	0.040	hm
			Mezcladora de concreto de 9 -11p3	0.011	hm
			Vibrador a gasolina 1 3/4", 4hp	0.000	hm
			Camión volquete 15 m3.	0.000	hm
4	Demolición de pavimento Fin de Vida	Articulado	Escombros de pavimento existente	0.322	tn
		m2	Transporte de escombros a botadero (6 km)	1.932	tnxkm
			Cargador sobre llantas 160-195 HP 3.5 yd3	0.015	hm

ANEXO 3: EMISIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Flujo	Categoría	Unidad	Resultado
light fuel oil	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	675.36
petrol, unleaded	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	541.8
heavy fuel oil	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	443.52
waste refinery gas		MJ	254.52
electricity, high voltage		MJ	187.7904
kerosene	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	168.336
demolition waste (unspecified)	Wastes	kg	132.3002
liquefied petroleum gas	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	71.316
naphtha	Manufactura de productos refinados de petróleo	kg	70.812
Carbon dioxide, fossil	Emisiones al aire	kg	58.29773
Heat, waste	Emisiones al aire	MJ	43.6797
Water	Emisiones al aire	kg	39.432
Krypton-85	Emisiones al aire	kBq	23.50809
sulfur		kg	13.9356
Carbon dioxide	Emisiones al aire	kg	5.286333
Carbon dioxide, fossil	Emisiones al aire	kg	2.9562
Heat, waste	Emisiones al aire	MJ	2.057581
Hydrogen-3, Tritium	Emisiones al agua	kBq	1.330079
VOC, volatile organic compounds	Emisiones al aire	kg	1.10466
refinery sludge		kg	0.97776
Sulfur dioxide	Emisiones al aire	kg	0.92988
petroleum coke		kg	0.6804
Radon-222	Emisiones al aire	kBq	0.490404
Carbon monoxide, fossil	Emisiones al aire	kg	0.4528
waste mineral oil		kg	0.405034
Air, used	Emisiones al aire	kg	0.315338
Sodium, ion	Emisiones al agua	kg	0.28476
Nitrogen oxides	Emisiones al aire	kg	0.244137
Sulfate	Emisiones al agua	kg	0.224466
Overburden (deposited)	Mercancías depositadas	kg	0.205528
Sodium, ion	Emisiones al agua	kg	0.193284
Water vapour	Emisiones al aire	kg	0.177532
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emisiones al aire	kg	0.1759
Chloride	Emisiones al agua	kg	0.171389
Pentane	Emisiones al aire	kg	0.16884
Butane	Emisiones al aire	kg	0.135072
Propane	Emisiones al aire	kg	0.135072
Sulfate	Emisiones al agua	kg	0.128772
Methane, fossil	Emisiones al aire	kg	0.1008
Heat, waste	Emisiones al agua	MJ	0.093153
Carbon monoxide, fossil	Emisiones al aire	kg	0.079886
Nitrogen oxides	Emisiones al aire	kg	0.070308
COD, Chemical Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.068632
Hexane	Emisiones al aire	kg	0.067536
Water	Emisiones al agua	m3	0.062328
Calcium, ion	Emisiones al agua	kg	0.055944
Chloride	Emisiones al agua	kg	0.051156
COD, Chemical Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.039312
Ethane	Emisiones al aire	kg	0.033768
Heptane	Emisiones al aire	kg	0.033768
Nitrogen dioxide	Emisiones al aire	kg	0.033393
Calcium, ion	Emisiones al agua	kg	0.032256
Nitrogen oxides	Emisiones al aire	kg	0.0303
TOC, Total Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	0.027973

Magnesium	Emisiones al agua	kg	0.027972
Particulates, > 10 um	Emisiones al aire	kg	0.0252
Toluene	Emisiones al aire	kg	0.020261
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emisiones al aire	kg	0.016139
TOC, Total Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	0.016103
Magnesium	Emisiones al agua	kg	0.016103
waste bitumen		kg	0.015985
Radium-226	Emisiones al agua	kBq	0.014837
Nitrogen, organic bound	Emisiones al agua	kg	0.014818
Benzene	Emisiones al aire	kg	0.013507
Xylene	Emisiones al aire	kg	0.013507
Particulates, < 2.5 um	Emisiones al aire	kg	0.012103
Potassium, ion	Emisiones al agua	kg	0.011189
Suspended solids, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.011189
Chloride	Emisiones al agua	kg	0.009518
Nitrate	Emisiones al agua	kg	0.009199
Carbon monoxide	Emisiones al aire	kg	0.009027
Nitrogen, organic bound	Emisiones al agua	kg	0.008518
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.007082
Ethene	Emisiones al aire	kg	0.006754
Propene	Emisiones al aire	kg	0.006754
Ammonium, ion	Emisiones al agua	kg	0.006728
Potassium, ion	Emisiones al agua	kg	0.006451
Suspended solids, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.006451
Methane	Emisiones al aire	kg	0.005375
Nitrate	Emisiones al agua	kg	0.005292
Fluoride	Emisiones al agua	kg	0.005015
Xenon-133	Emisiones al aire	kBq	0.004499
Benzene	Emisiones al aire	kg	0.004407
Sulfur dioxide	Emisiones al aire	kg	0.004333
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.004082
Hydrogen-3, Tritium	Emisiones al aire	kBq	0.003881
Ammonium, ion	Emisiones al agua	kg	0.003856
Particulates, < 2.5 um	Emisiones al aire	kg	0.003604
Benzene, ethyl-	Emisiones al aire	kg	0.003377
Butene	Emisiones al aire	kg	0.003377
Particulates, > 10 um	Emisiones al agua	kg	0.003342
Dinitrogen monoxide	Emisiones al aire	kg	0.002999
spoil (unspecified)	Wastes	kg	0.002986
Oils, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.002974
Fluoride	Emisiones al agua	kg	0.002873
spent catalytic converter NOx reduction		kg	0.00252
Dinitrogen monoxide	Emisiones al aire	kg	0.00237
Formaldehyde	Emisiones al aire	kg	0.002152
Argon-41	Emisiones al aire	kBq	0.001992
Oils, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.001711
Methane	Emisiones al aire	kg	0.0015
Xenon-135	Emisiones al aire	kBq	0.001487
Toluene	Emisiones al agua	kg	0.001121
Carbonate	Emisiones al agua	kg	0.001041
Acetaldehyde	Emisiones al aire	kg	0.000967
Carbon-14	Emisiones al aire	kBq	0.000914
Hydrocarbons, aromatic	Emisiones al agua	kg	0.000806
Strontium	Emisiones al agua	kg	0.000784
Particulates, > 10 um	Emisiones al aire	kg	0.000736
Sulfate	Emisiones al agua	kg	0.000716
Toluene	Emisiones al agua	kg	0.000643
Particulates, > 10 um	Emisiones al agua	kg	0.000638
Oxygen, en agua	Emisiones al aire	kg	0.000635

Iron, ion	Emisiones al agua	kg	0.000559
Propane	Emisiones al aire	kg	0.000515
Sulfur dioxide	Emisiones al aire	kg	0.00051
Ammonia	Emisiones al aire	kg	0.000491
Hydrocarbons, aromatic	Emisiones al agua	kg	0.000464
Strontium	Emisiones al agua	kg	0.000451
Boron	Emisiones al agua	kg	0.000449
Phosphorus	Emisiones al agua	kg	0.000433
Cesium-137	Emisiones al agua	kBq	0.000423
Benzene	Emisiones al aire	kg	0.000381
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emisiones al aire	kg	0.000368
Lead	Emisiones al agua	kg	0.000355
t-Butyl methyl ether	Emisiones al agua	kg	0.000355
Iron, ion	Emisiones al agua	kg	0.000323
Hydrocarbons, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.000307
Ethane	Emisiones al aire	kg	0.000305
Sulfide	Emisiones al agua	kg	0.000301
Methane, fossil	Emisiones al aire	kg	0.000277
Toluene	Emisiones al aire	kg	0.000274
Uranium-238	Emisiones al agua	kBq	0.00026
Boron	Emisiones al agua	kg	0.000257
Chromium, ion	Emisiones al agua	kg	0.00025
Phosphorus	Emisiones al agua	kg	0.000249
Manganese	Emisiones al agua	kg	0.000225
Propanal	Emisiones al aire	kg	0.000215
Xylene	Emisiones al aire	kg	0.000209
t-Butyl methyl ether	Emisiones al agua	kg	0.000204
Lead	Emisiones al agua	kg	0.000204
Phenol	Emisiones al agua	kg	0.000201
Dinitrogen monoxide	Emisiones al aire	kg	0.0002
Cobalt-60	Emisiones al agua	kBq	0.000196
Cyanide	Emisiones al agua	kg	0.000194
Zinc, ion	Emisiones al agua	kg	0.000193
Ammonia	Emisiones al aire	kg	0.000185
Hydrocarbons, unspecified	Emisiones al agua	kg	0.000176
COD, Chemical Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.000162
Chromium, ion	Emisiones al agua	kg	0.000144
Iodine-129	Emisiones al agua	kBq	0.00013
Manganese	Emisiones al agua	kg	0.000129
Barium	Emisiones al agua	kg	0.000128
Xylene	Emisiones al agua	kg	0.000114
Phenol	Emisiones al agua	kg	0.000112
Cyanide	Emisiones al agua	kg	0.000112
Zinc, ion	Emisiones al agua	kg	0.000111
Butane	Emisiones al aire	kg	0.000107
Carbonate	Emisiones al agua	kg	0.000103
Sodium	Emisiones al agua	kg	0.000103
Lead	Emisiones al aire	kg	0.0001
Nitrogen, atmospheric	Emisiones al aire	kg	9.14E-05
Ammonia	Emisiones al suelo	kg	8.72E-05
DOC, Dissolved Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	6.9E-05
Barium	Emisiones al agua	kg	6.45E-05
Sulfide	Emisiones al agua	kg	6.45E-05
Xylene	Emisiones al agua	kg	6.45E-05
Benzene, ethyl-	Emisiones al aire	kg	5.66E-05
Aluminium	Emisiones al agua	kg	5.59E-05
Acrolein	Emisiones al aire	kg	5.52E-05
Strontium	Emisiones al suelo	kg	5.51E-05
Xenon-138	Emisiones al aire	kBq	5.02E-05

Phosphate	Emisiones al suelo	kg	4.99E-05
Particulates, < 10 um	Emisiones al aire	kg	4.62E-05
Cesium-134	Emisiones al agua	kBq	4.58E-05
Carbon-14	Emisiones al agua	kBq	4.56E-05
TOC, Total Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	4.55E-05
Strontium-90	Emisiones al agua	kBq	4.35E-05
municipal solid waste		kg	4.04E-05
DOC, Dissolved Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	3.98E-05
Pentane	Emisiones al aire	kg	3.65E-05
Hexane	Emisiones al aire	kg	3.45E-05
Butadiene	Emisiones al aire	kg	3.39E-05
Vanadium, ion	Emisiones al agua	kg	3.35E-05
Nitrogen	Emisiones al agua	kg	3.26E-05
Aluminium	Emisiones al agua	kg	3.23E-05
Silver, ion	Emisiones al agua	kg	3.23E-05
Copper	Emisiones al aire	kg	3.14E-05
Decane	Emisiones al agua	kg	3.12E-05
Manganese-54	Emisiones al agua	kBq	3.04E-05
Chloride	Emisiones al suelo	kg	3.02E-05
Benzene	Emisiones al agua	kg	2.84E-05
Xenon-131m	Emisiones al aire	kBq	2.75E-05
Potassium	Emisiones al suelo	kg	2.18E-05
Sulfide	Emisiones al agua	kg	2E-05
Vanadium, ion	Emisiones al agua	kg	1.93E-05
Zinc	Emisiones al aire	kg	1.85E-05
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Emisiones al agua	kg	1.77E-05
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emisiones al agua	kg	1.77E-05
Selenium	Emisiones al agua	kg	1.68E-05
Sulfide	Emisiones al suelo	kg	1.65E-05
Sodium	Emisiones al agua	kg	1.6E-05
Iron	Emisiones al agua	kg	1.54E-05
Nickel, ion	Emisiones al agua	kg	1.48E-05
Benzene	Emisiones al agua	kg	1.44E-05
2,2,4-trimethylpentane	Emisiones al aire	kg	1.31E-05
Uranium-238	Emisiones al aire	kBq	1.2E-05
Molybdenum	Emisiones al agua	kg	1.12E-05
Copper, ion	Emisiones al agua	kg	1.12E-05
Arsenic, ion	Emisiones al agua	kg	1.12E-05
Cadmium, ion	Emisiones al agua	kg	1.12E-05
Particulates, < 10 um	Emisiones al aire	kg	1.09E-05
Styrene	Emisiones al aire	kg	1.08E-05
Fluoride	Emisiones al agua	kg	1.06E-05
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Emisiones al agua	kg	1.02E-05
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emisiones al agua	kg	1.02E-05
Ammonia	Emisiones al aire	kg	0.00001

Nota: Se consideran las emisiones con cantidades mayores a 1×10^{-6} por m^2

ANEXO 4: EMISIONES DEL PAVIMENTO ARTICULADO DE CONCRETO

Flujo	Categoría	Unidad	Resultado
demolition waste (unspecified)	Desechos	kg	382.0003
Carbon dioxide, fossil	Emisiones al aire	kg	48.23739
Krypton-85	Emisiones al aire	kBq	40.9977
Heat, waste	Emisiones al aire	MJ	22.49416
Water	Emisiones al aire	kg	6.533604
Carbon dioxide	Emisiones al aire	kg	5.962911
Hydrogen-3, Tritium	Emisiones al agua	kBq	2.160038
Radon-222	Emisiones al aire	kBq	0.796438
Air, used	Emisiones al aire	kg	0.506126
waste mineral oil		kg	0.335282
Overburden (deposited)	Bienes almacenados	kg	0.324367
Water vapour	Emisiones al aire	kg	0.283765
Nitrogen oxides	Emisiones al aire	kg	0.201867
Heat, waste	Emisiones al agua	MJ	0.149684
Chloride	Emisiones al agua	kg	0.12115
Carbon monoxide, fossil	Emisiones al aire	kg	0.066004
Nitrogen dioxide	Emisiones al aire	kg	0.036577
Radium-226	Emisiones al agua	kBq	0.024095
Water	Emisiones al agua	m3	0.022319
municipal solid waste		kg	0.021875
Particulates, unspecified	Emisiones al aire	kg	0.020963
wastewater from concrete production		m3	0.014578
Chloride	Emisiones al agua	kg	0.014513
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emisiones al aire	kg	0.014306
Particulates, < 2.5 um	Emisiones al aire	kg	0.010207
Carbon monoxide	Emisiones al aire	kg	0.009794
Methane	Emisiones al aire	kg	0.008022
Xenon-133	Emisiones al aire	kBq	0.007306
Sulfur dioxide	Emisiones al aire	kg	0.006372
Hydrogen-3, Tritium	Emisiones al aire	kBq	0.006303
Particulates, > 10 um	Emisiones al agua	kg	0.004963
spoil (unspecified)	Desechos	kg	0.004444
Argon-41	Emisiones al aire	kBq	0.003235
Xenon-135	Emisiones al aire	kBq	0.002416
Dinitrogen monoxide	Emisiones al aire	kg	0.001998
Formaldehyde	Emisiones al aire	kg	0.001778
Carbonate	Emisiones al agua	kg	0.001534
Carbon-14	Emisiones al aire	kBq	0.001484
Sulfate	Emisiones al agua	kg	0.001305
Oxygen, in air	Emisiones al aire	kg	0.001043
Particulates, > 10 um	Emisiones al agua	kg	0.000947
Acetaldehyde	Emisiones al aire	kg	0.000799
Propane	Emisiones al aire	kg	0.000762
Cesium-137	Emisiones al agua	kBq	0.000687
Sulfate	Emisiones al agua	kg	0.000646
Particulates, > 10 um	Emisiones al aire	kg	0.000608
Ethane	Emisiones al aire	kg	0.000444
Uranium-238	Emisiones al agua	kBq	0.000423
Ammonia	Emisiones al aire	kg	0.000417
Benzene	Emisiones al aire	kg	0.000322
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emisiones al aire	kg	0.00032
Cobalt-60	Emisiones al agua	kBq	0.000319
Sulfide	Emisiones al agua	kg	0.000279

COD, Chemical Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.000277
Methane, fossil	Emisiones al aire	kg	0.000229
Toluene	Emisiones al aire	kg	0.000227
Iodine-129	Emisiones al agua	kBq	0.000211
Propanal	Emisiones al aire	kg	0.000178
Xylene	Emisiones al aire	kg	0.000176
Butane	Emisiones al aire	kg	0.000159
Sodium	Emisiones al agua	kg	0.000155
Carbonate	Emisiones al agua	kg	0.000151
Nitrogen, atmospheric	Emisiones al aire	kg	0.000139
Sulfur oxides	Emisiones al aire	kg	0.000132
COD, Chemical Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	0.00013
Ammonia	Emisiones al suelo	kg	0.000129
Lead	Emisiones al aire	kg	0.0001
Particulates, < 10 um	Emisiones al aire	kg	8.38E-05
Xenon-138	Emisiones al aire	kBq	8.16E-05
Strontium	Emisiones al suelo	kg	8.14E-05
TOC, Total Organic Carbon sludge from steel rolling	Emisiones al agua	kg	8.14E-05
Cesium-134	Emisiones al agua	kBq	7.43E-05
Carbon-14	Emisiones al agua	kBq	7.4E-05
Phosphate	Emisiones al suelo	kg	7.37E-05
Strontium-90	Emisiones al agua	kBq	7.06E-05
Nitrogen	Emisiones al agua	kg	6.1E-05
Pentane	Emisiones al aire	kg	5.43E-05
Manganese-54	Emisiones al agua	kBq	4.94E-05
Benzene, ethyl-	Emisiones al aire	kg	4.69E-05
Decane	Emisiones al agua	kg	4.61E-05
Acrolein	Emisiones al aire	kg	4.56E-05
Xenon-131m	Emisiones al aire	kBq	4.46E-05
Chloride	Emisiones al suelo	kg	4.46E-05
Potassium	Emisiones al suelo	kg	3.23E-05
Hexane	Emisiones al aire	kg	3.21E-05
Sulfide	Emisiones al agua	kg	3E-05
Butadiene	Emisiones al aire	kg	2.8E-05
Copper	Emisiones al aire	kg	2.6E-05
Iron	Emisiones al agua	kg	2.55E-05
Sulfide	Emisiones al suelo	kg	2.45E-05
Barium	Emisiones al agua	kg	2.44E-05
Sodium	Emisiones al agua	kg	2.38E-05
Uranium-238	Emisiones al aire	kBq	1.93E-05
Fluoride	Emisiones al agua	kg	1.78E-05
Hydrogen chloride	Emisiones al aire	kg	1.59E-05
Zinc	Emisiones al aire	kg	1.55E-05
Uranium-235	Emisiones al aire	kBq	1.33E-05
slag (unspecified)	Desechos	kg	1.27E-05
Particulates, < 10 um	Emisiones al aire	kg	1.24E-05
Zinc	Emisiones al agua	kg	1.24E-05
Hydrogen sulfide	Emisiones al aire	kg	1.23E-05
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	1.2E-05
2,2,4-trimethylpentane	Emisiones al aire	kg	1.08E-05
Phenol	Emisiones al agua	kg	1.07E-05
Chloride	Emisiones al aire	kg	9.37E-06
Styrene	Emisiones al aire	kg	8.94E-06
Phosphate	Emisiones al agua	kg	8.34E-06
Iron	Emisiones al agua	kg	7.59E-06
Strontium	Emisiones al agua	kg	7.57E-06
basic oxygen furnace waste		kg	7.27E-06
Ammonia	Emisiones al agua	kg	6.78E-06

Calcium	Emisiones al agua	kg	6.66E-06
Plutonium-alpha	Emisiones al agua	kBq	5.82E-06
Heptane	Emisiones al aire	kg	5.48E-06
Vanadium	Emisiones al aire	kg	5.41E-06
Benzene	Emisiones al agua	kg	4.88E-06
Fluoride	Emisiones al aire	kg	4.7E-06
Decane	Emisiones al agua	kg	4.62E-06
Naphthalene	Emisiones al aire	kg	4.4E-06
Sulfate	Emisiones al suelo	kg	4.08E-06
Barium	Emisiones al aire	kg	3.71E-06
Uranium-234	Emisiones al aire	kBq	3.46E-06
Xylene	Emisiones al agua	kg	3.33E-06
Iodine-129	Emisiones al aire	kBq	3.17E-06
Octane	Emisiones al aire	kg	3.02E-06
dust, unalloyed electric arc furnace steel		kg	2.95E-06
Toluene	Emisiones al agua	kg	2.67E-06
Chloride	Emisiones al agua	kg	2.64E-06
Phenanthrene	Emisiones al aire	kg	2.48E-06
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Emisiones al agua	kg	2.45E-06
Barium	Emisiones al agua	kg	2.41E-06
Hydrogen	Emisiones al aire	kg	2.01E-06
Nitrate	Emisiones al agua	kg	1.99E-06
Curium alpha	Emisiones al agua	kBq	1.94E-06
Phenol	Emisiones al agua	kg	1.68E-06
VOC, volatile organic compounds	Emisiones al aire	kg	1.62E-06
Ruthenium-106	Emisiones al agua	kBq	1.46E-06
Americium-241	Emisiones al agua	kBq	1.46E-06
Fluoride	Emisiones al suelo	kg	1.27E-06
Acetic acid	Emisiones al agua	kg	1.21E-06
BOD5, Biological Oxygen Demand	Emisiones al agua	kg	1.19E-06
TOC, Total Organic Carbon	Emisiones al agua	kg	1.19E-06
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emisiones al aire	kg	1.17E-06
Chlorine	Emisiones al agua	kg	1.17E-06
Iron, ion	Emisiones al agua	kg	1.15E-06
Hydrogen fluoride	Emisiones al aire	kg	1.06E-06
Nickel	Emisiones al aire	kg	1.03E-06
Nitrate	Emisiones al agua	kg	1E-06
Fluorene	Emisiones al aire	kg	9.55E-07
Acenaphthene	Emisiones al aire	kg	9.53E-07
Benzene	Emisiones al agua	kg	8.85E-07
Cesium-137	Emisiones al aire	kBq	8.3E-07
Naphthalene	Emisiones al agua	kg	8.27E-07
Copper	Emisiones al agua	kg	8.24E-07
Aluminium	Emisiones al agua	kg	8.23E-07
Acenaphthylene	Emisiones al aire	kg	8.01E-07
Manganese	Emisiones al agua	kg	7.94E-07
Chromium	Emisiones al agua	kg	6.99E-07
Copper	Emisiones al agua	kg	6.93E-07
Xenon-137	Emisiones al aire	kBq	6.33E-07
Cobalt	Emisiones al agua	kg	6.18E-07
Chromium	Emisiones al agua	kg	6E-07
Benzene, ethyl-	Emisiones al agua	kg	5.96E-07
Cobalt-58	Emisiones al agua	kBq	5.68E-07
Toluene	Emisiones al agua	kg	5.32E-07
Nickel	Emisiones al agua	kg	4.96E-07
Iron	Emisiones al aire	kg	4.87E-07

Nota: Se consideran las emisiones con cantidades mayores a 1×10^{-7} por m^2