

## **ANEXO 7: EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA**

---

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1	Introducción .....	3
2.2	Categorías de Impacto Ambiental .....	3
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE ANÁLISIS .....</b>	<b>5</b>
3.1	Objetivo y Alcance .....	5
3.2	Unidad Funcional.....	5
3.3	Límites del Sistema .....	7
3.4	Inventario del Ciclo de Vida (ICV) .....	8
3.4.1	Extracción de Materia Prima.....	9
3.4.2	Producción de Mezclas y Capas Granulares.....	12
3.4.3	Construcción .....	14
3.4.4	Mantenimiento .....	15
3.5	Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV).....	16
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
4.1	Potencial de Calentamiento Global (GWP <sub>100</sub> ) .....	17
4.2	Potencial de Acidificación (AP).....	18
4.3	Potencial de Eutrofización (EP).....	18
4.4	Toxicidad Humana (TH).....	18
4.5	Eco-toxicidad .....	19
4.6	Consumo energético .....	19
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>20</b>
5.1	MATRIZ MULTICRITERIO.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de análisis del ciclo de vida .....	3
Figura 3.1: Sección transversal tipo de pavimento flexible .....	6
Figura 3.2: Sección transversal tipo de pavimento rígido convencional.....	6
Figura 3.3: Sección transversal tipo de pavimento rígido convencional.....	7
Figura 3.4: Diagrama de los límites del sistema y procesos clave para pavimento flexible.....	7
Figura 3.5: Diagrama de los límites del sistema y procesos clave para pavimentos rígidos .....	8
Figura 4.1: Resultados comparativos de categorías de impacto.....	19
Figura 5.1: Matriz multicriterio de alternativas de pavimentación.....	21

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Principales categorías de impacto ambiental .....	4
Tabla 3.1: Estructuras de pavimentos .....	5
Tabla 3.2: Principales fuentes de datos del ICV .....	8
Tabla 3.3: Extracción de petróleo crudo ICV [5] .....	9
Tabla 3.4: Producción del asfalto convencional en refinería ICV [5] .....	10
Tabla 3.5: Almacenamiento del asfalto convencional ICV [5].....	10
Tabla 3.6: Asfalto modificado con polímeros ICV [6] .....	10
Tabla 3.7: Producción de agregados ICV [7].....	11
Tabla 3.8: Producción de cemento ICV [8] .....	11
Tabla 3.9: Varillas de acero ICV [8] .....	12
Tabla 3.10: Fibras de polietileno ICV [8] .....	12
Tabla 3.11: Producción de mezcla asfáltica en caliente ICV [8] .....	13
Tabla 3.12: Materiales y uso energético en la producción de hormigón.....	13
Tabla 3.13: Materiales en la producción de base granular virgen .....	13
Tabla 3.14: Materiales en la producción de sub-base de reciclado estabilizado con cemento .....	14
Tabla 3.15: Especificaciones de equipos para construcción de pavimento asfáltico [8] .....	14
Tabla 3.16: Equipos para construcción de pavimento asfáltico ICV [8].....	14
Tabla 3.17: Construcción de pavimentos rígidos ICV [8].....	15
Tabla 3.18: Factores de categorías de impacto [9] .....	16
Tabla 4.1: Resultados de emisiones al aire y consumo energético para todas las alternativas.....	17
Tabla 4.2: Resultados de potencial de calentamiento global en kg CO <sub>2</sub> -eq. ....	17
Tabla 4.3: Resultados de potencial de acidificación en kg SO <sub>2</sub> -eq. ....	18
Tabla 4.4: Resultados de potencial de eutrofización en kg PO <sub>4</sub> -eq.....	18
Tabla 4.5: Resultados de toxicidad humana en kg 1,4DCB-eq. ....	18
Tabla 4.6: Resultados de eco-toxicidad en kg 1,4DCB-eq. ....	19
Tabla 4.7: Resultados de consumo energético en MJ.....	19

## 1 INTRODUCCIÓN

En un contexto donde el transporte terrestre ha experimentado una transformación significativa en los últimos años en Paraguay, la planificación y construcción de infraestructuras viales requiere un enfoque integral que considere no solo los aspectos de funcionalidad y durabilidad, sino también los impactos ambientales asociados.

El presente informe ha sido elaborado con el propósito principal de analizar y comparar las emisiones de gases de efecto invernadero y la energía incorporada en las alternativas de pavimentación diseñadas para el tramo de la Ruta PY05 Pozo Colorado – Concepción, desde el km 318,920 al km 409,118 (pre puente Nanawa).

Para llevar a cabo este análisis comparativo, se emplearon metodologías de evaluación del ciclo de vida, las cuales permiten medir y cuantificar los posibles efectos ambientales. El estudio consideró únicamente las etapas de **extracción/obtención de materia prima, fabricación o producción de materiales, construcción del pavimento, y mantenimiento**. No fueron incluidas las fases de uso, el transporte de materiales, la reutilización o demolición y disposición final.

El análisis comparativo de pavimentos realizado en este informe constituye un paso fundamental hacia la identificación de soluciones viales que sean compatibles con los objetivos ambientales a nivel mundial. Se espera que los resultados obtenidos proporcionen una visión clara y fundamentada sobre el impacto ambiental y sirvan como base para la toma de decisiones estratégicas en materia de infraestructura vial, impulsando el desarrollo de proyectos más sostenibles y resilientes a largo plazo.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Introducción

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una técnica para evaluar el impacto ambiental total de un producto o servicio, desde la obtención de materia prima hasta el desecho o tratamiento como residuo [1], tal como se muestra en la [Figura 2.1](#). En un ACV, las emisiones y los recursos consumidos relacionados con un producto específico se compilan y documentan en un Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Luego, se realiza una evaluación de impacto, considerando generalmente tres áreas de protección: la salud humana, el medio ambiente natural y las cuestiones relacionadas con el uso de los recursos naturales [2].



Fuente: Adaptado de [5]

**Figura 2.1: Diagrama de análisis del ciclo de vida**

### 2.2 Categorías de Impacto Ambiental

Las principales categorías de impacto en un Análisis de Impacto del Ciclo de Vida (AICV) son: el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) o cambio climático, la depleción de la capa de ozono, la eutrofización, la acidificación, la toxicidad humana, las sustancias inorgánicas respiratorias, las radiaciones ionizantes, la eco-toxicidad, la formación de ozono fotoquímico, el uso de suelo, y el agotamiento de los recursos [3]. Las categorías de impacto y sus indicadores conceptuados en un AICV, se pueden clasificar de acuerdo a la [Tabla 2.1](#), donde se indican los contaminantes y factores unitarios correspondientes.

**Tabla 2.1: Principales categorías de impacto ambiental**

Categoría de Impacto	Indicador característico`	Contaminantes	Factor unitario
Potencial de calentamiento global (GWP)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	kg CO <sub>2</sub> -eq. (100 años)
Acidificación (AP)	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub>	kg SO <sub>2</sub> -eq.
Eutrofización (EP)	NO <sub>3</sub> -	NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub> DQO PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> NO <sub>3</sub> -	kg PO <sub>4</sub> -eq.
Fotooxidación del ozono a nivel del suelo (POCP)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> CO SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> COVNM (*)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.
Depleción del ozono estratosférico (ODP)	CFC	CFC Halcones	kg CFC <sub>11</sub> -eq.
Toxicidad Humana (TH)	Emisión al aire y Emisión al agua dulce	SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> CO HAP <sup>(a)</sup> COVNM (*) PM <sub>10</sub> <sup>(b)</sup> NH <sub>3</sub> Metales pesados <sup>(c)</sup>	kg 1,4-DCB-eq.
Eco-toxicidad <sup>(d)</sup>	Emisión al aire y Emisión al agua dulce	COVNM (*) HAP <sup>(a)</sup> Metales pesados <sup>(c)</sup>	kg 1,4-DCB-eq.
Uso de combustibles fósiles	Consumo de Energía	Combustibles fósiles	MJ

Fuente: Adaptado de [6]

(\*) COVNM: compuestos orgánicos volátiles no metanos.

(a) HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) cancerígenos.

(b) Partículas en suspensión de tamaño inferior a 10 micrómetros.

(c) Valor total de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb).

(d) Factor medio de "ecotoxicidad acuática en agua dulce", "ecotoxicidad acuática marina" y "ecotoxicidad terrestre".

### 3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La metodología de este estudio para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) sigue las directrices establecidas por la Organización Internacional de Normalización en la ISO 14040:2020 e ISO 14044:2018. A continuación, se detallan las principales fases según estas recomendaciones.

#### 3.1 Objetivo y Alcance

El propósito principal de este estudio es analizar el comportamiento medioambiental del ciclo de vida de **tres tipos de pavimentos: asfáltico flexible, rígido convencional, y rígido con fibra**. El impacto ambiental es inducido principalmente por el uso de energía y recursos naturales, y por las emisiones provenientes de la combustión y adquisición de energía y otras emisiones durante procesos varios. Las categorías de impacto ambiental evaluadas en el presente informe fueron las siguientes:

- **Potencial de calentamiento global (GWP):** medida que compara el impacto climático de diferentes gases de efecto invernadero durante un período de 100 años, expresado en términos de dióxido de carbono equivalente.
- **Acidificación (AP):** el aumento de la acidez en suelos, agua o atmósfera, a menudo causado por emisiones de sustancias ácidas como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.
- **Eutrofización (EP):** el enriquecimiento desmedido de nutrientes (como nitrógeno y fósforo) en cuerpos de agua, provocando un crecimiento excesivo de algas y afectando el equilibrio del ecosistema acuático.
- **Toxicidad humana (TH):** el grado en que una sustancia puede causar daño a la salud humana.
- **Eco-toxicidad:** el impacto nocivo de una sustancia en los organismos y ecosistemas acuáticos y terrestres.
- **Consumo energético:** la cantidad de energía utilizada para realizar un proceso específico.

Las demás categorías de impacto no fueron calculadas en esta instancia. Además, no se consideró el impacto ambiental debido al ruido generado durante la construcción, los requisitos de iluminación, etc.

#### 3.2 Unidad Funcional

La unidad funcional se define como una medida para cuantificar el desempeño del sistema investigado para ser utilizada como unidad de referencia [4]. Para esta investigación se determinó unidad funcional de pavimento vial de **1 km de largo por 9 m de ancho** (calzada doble de 3,5m y banquetas de 1m), diseñada a **20 años** para una carga de tránsito de 10.520.677 ejes equivalentes. La sección transversal tipo para el pavimento flexible, rígido convencional y rígido con fibras se muestra en la [Figura 3.1](#), [Figura 3.2](#), y [Figura 3.3](#), respectivamente. Las estructuras varían según el tipo de pavimento y los paquetes considerados se identifican en la [Tabla 3.1](#). El análisis de impacto del pavimento flexible incluye a las **capas asfálticas y base granular**, y de los pavimentos rígidos, a **las losas de hormigón**. La capa de **sub-base de reciclado cementada** será considerada de un mismo tipo de material a pesar de tener diferentes requerimientos de valor soporte, con el único fin de identificar diferencias por el aumento de espesor. La capa de ripio reprocesado no será considerada en este análisis.

**Tabla 3.1: Estructuras de pavimentos**

Paquetes Estructurales	
<i>Pavimento Flexible</i>	
Recapado asfáltico (a los 10 años)	5 cm
Carpeta de concreto asfáltico con polímeros	5 cm
Base de concreto asfáltico convencional	5 cm
Base granular virgen CBR 100%	20 cm
Sub-base de reciclado (RAP+BG) CBR 40% estabilizada con cemento 20kg/cm <sup>2</sup> y RR:80%	21 cm
Capa de ripio reprocesado	20 cm

## EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL IMPACTO DE CICLO VIDA

### Caso Comparativo: Pavimento Flexible, Pavimento Rígido Convencional, Pavimento Rígido con Fibras

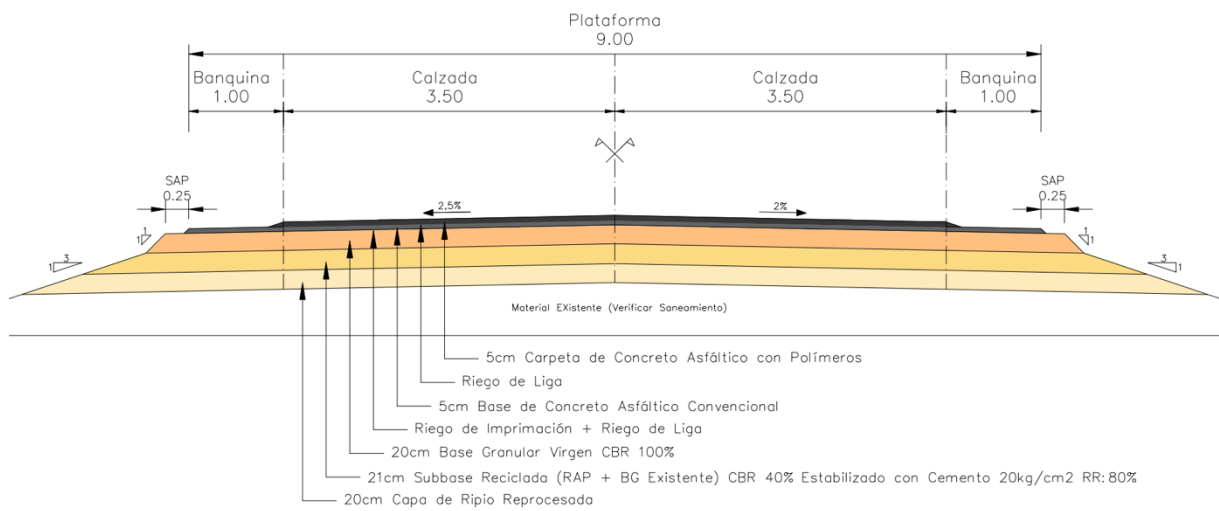
#### Paquetes Estructurales

##### *Pavimento Rígido Convencional*

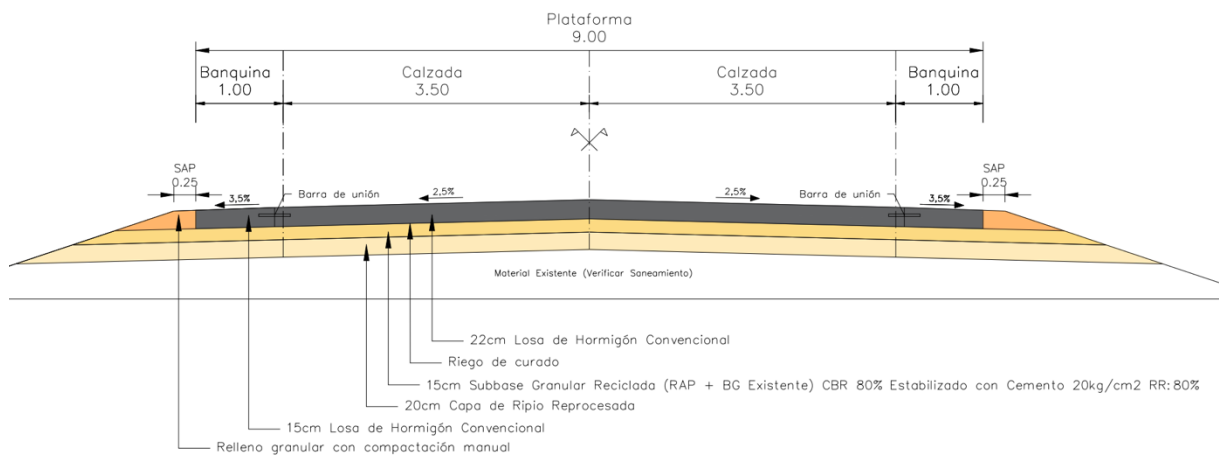
Losa de hormigón convencional	22 cm
Sub-base de reciclado (RAP+BG) CBR 40% estabilizada con cemento 20kg/cm <sup>2</sup> y RR:80%	15 cm
Capa de ripio reprocesado	20 cm

##### *Pavimento Rígido con Fibras*

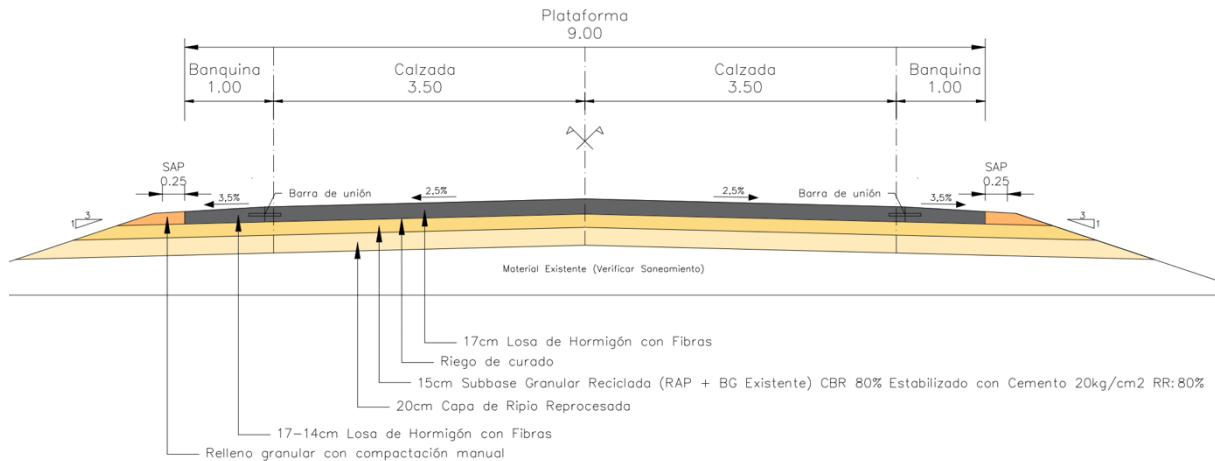
Losa de hormigón reforzado con fibras	17 cm
Sub-base de reciclado (RAP+BG) CBR 40% estabilizada con cemento 20kg/cm <sup>2</sup> y RR:80%	15 cm
Capa de ripio reprocesado	20 cm



**Figura 3.1: Sección transversal tipo de pavimento flexible**



**Figura 3.2: Sección transversal tipo de pavimento rígido convencional**



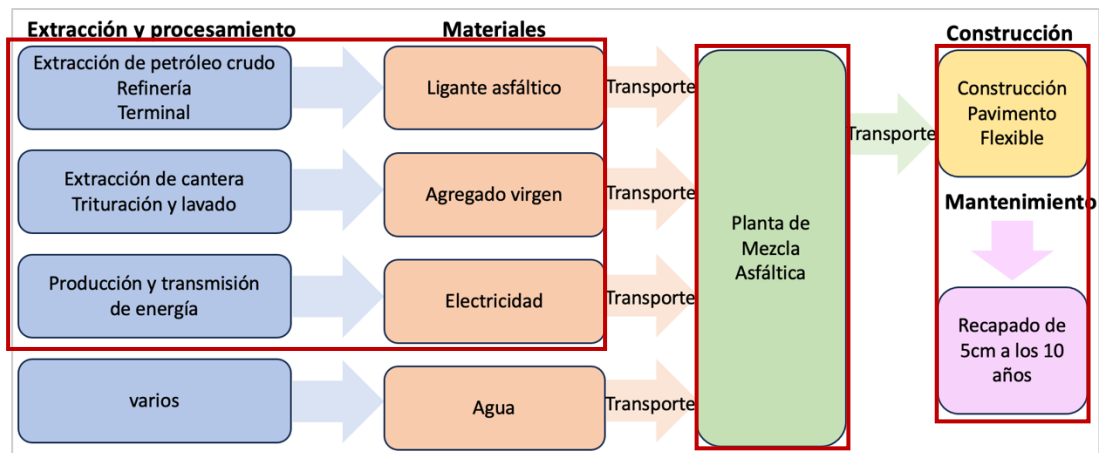
**Figura 3.3: Sección transversal tipo de pavimento rígido convencional**

### 3.3 Límites del Sistema

En la etapa de límites del sistema, los sistemas de producción se definen como un modelo que representa los elementos principales de los sistemas físicos. La elección de los factores principales en los límites del sistema depende en gran medida del objetivo y el alcance del estudio [4]. El presente análisis presenta límites en el sistema de la cuna hasta la tumba. El mismo incluye las etapas de materias primas, producción de la mezcla asfáltica y hormigón, y construcción. La etapa de mantenimiento es únicamente considerada para el pavimento asfáltico, debido a que se deben igualar las condiciones funcionales de diseño a 20 años.

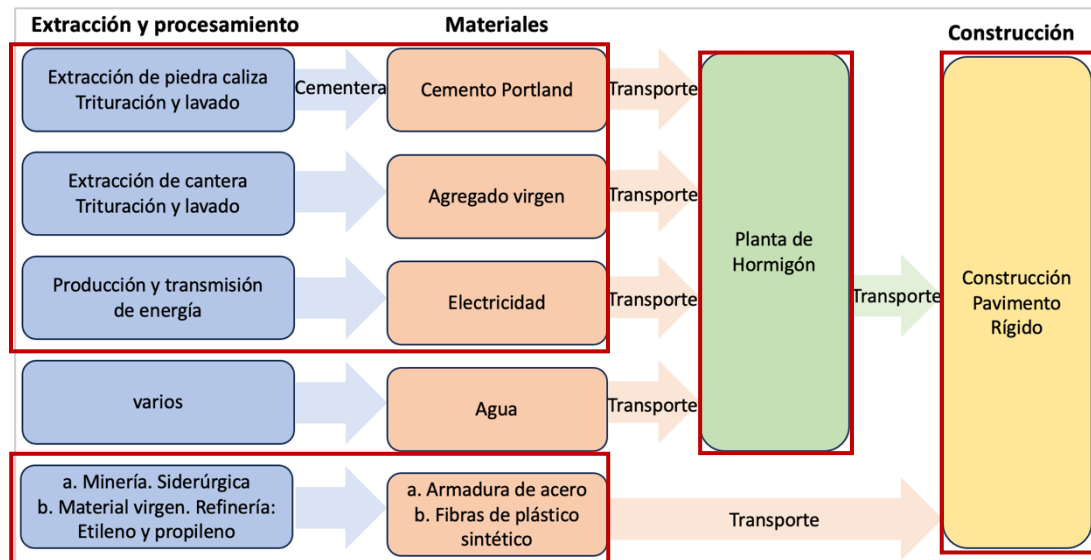
Este estudio limita el sistema en tres fases principales: (1) adquisición de materia prima, (2) producción de la mezcla asfáltica y hormigón, (3) procesos de construcción, y una fase adicional en flexible: (4) obras de mantenimiento.

Los diagramas de flujo de los límites del sistema para pavimentos flexibles y pavimentos rígidos se muestran en la [Figura 3.4](#) y [Figura 3.5](#), respectivamente. Se pueden evidenciar principalmente las diferencias en materias primas y la adición de la etapa de mantenimiento en el pavimento flexible. Se señalan en rojo los procesos considerados para el análisis. En ningún caso se considera la obtención del agua, y además, no se incluye el transporte de los materiales hasta la planta de producción ni desde la planta de producción de mezclas hasta el sitio de construcción.



**Figura 3.4: Diagrama de los límites del sistema y procesos clave para pavimento flexible**





**Figura 3.5: Diagrama de los límites del sistema y procesos clave para pavimentos rígidos**

### 3.4 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

La recolección, cálculo y análisis de datos se realiza en la etapa de inventario del ciclo de vida para cuantificar los insumos ambientales, el consumo de energía y materias primas y evaluar las emisiones asociadas con el ciclo de vida del pavimento [4]. En la [Tabla 3.2](#) se muestra las fuentes principales utilizadas para los datos del inventario en cada etapa del sistema.

**Tabla 3.2: Principales fuentes de datos del ICV**

Fase del sistema	Unidad representativa	Limitaciones/Asunciones	Base de datos utilizada
1. Extracción de materia prima <i>a. pavimento flexible</i> <i>b. pavimentos rígido convencional</i> <i>b. pavimento rígido reforzado con fibras</i>	a. ligante asfáltico convencional	4% del volumen total de la mezcla convencional.	Eurobitume, 2020 [5]
	a. ligante asfáltico modificado con polímeros	el concreto asfáltico se modificará por vía húmeda 96,5% asfalto 3,5% polímeros	Eurobitume, 2012 [6]
	a. base granular virgen	no se incluye impacto de etapa de construcción.	Athena Institute, 2006 [7]
	a-b-c. sub-base reciclado cementado	no se incluye impacto de etapa de construcción.	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
	a-b-c. agregado virgen	-	Athena Institute, 2006 [7]
	b-c. cemento portland	-	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
	b. armadura de acero	consumo de zinc en el proceso de galvanizado: 0,5 % del peso del acero	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
	c. fibras de plástico	polietileno	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
2. Producción de mezclas <i>a. mezclas asfálticas</i> <i>b. hormigón</i>	a. planta asfáltica en caliente	contenido de asfalto 5%	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
	b. planta de hormigón	misma dosificación para hormigón convencional y hormigón reforzado con fibras	Athena Institute, 2006 [7]
3. Construcción <i>a. pavimento flexible</i>	a. extendedora asfáltica	Dynapac F16	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]

## EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL IMPACTO DE CICLO VIDA

### Caso Comparativo: Pavimento Flexible, Pavimento Rígido Convencional, Pavimento Rígido con Fibras

Fase del sistema	Unidad representativa	Limitaciones/ Asunciones	Base de datos utilizada
<i>b. pavimentos rígidos</i>	a-b. compactador	Dynapac CC 421	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
	b. extendedora de hormigón	encofrado deslizante	IVL Swedish Environmental Research Institute, 2001 [8]
4. Mantenimiento (solo en pavimento flexible. incluye: materia prima, producción de mezcla, transporte a pista, construcción)	-	resultados obtenidos en las fases 1 al 4 para la capa de concreto asfáltico modificado con polímeros.	varios.

Las maquinarias identificadas fueron utilizadas a modo de cálculo, pudiendo haber otras opciones o implicancias, como el uso de camiones volquetes, mixers, etc.

### 3.4.1 Extracción de Materia Prima

#### 3.4.1.1 Ligante asfáltico convencional

El ICV del ligante asfáltico incluye tres etapas principales de producción: extracción del petróleo crudo, refinación de betún, y almacenamiento final. Para la extracción de petróleo crudo, los datos de inventario se basaron en las siguientes etapas del proceso primario: perforación, extracción y separación de petróleo y gas, procesamiento de petróleo en la etapa inicial, transporte de petróleo crudo a través de oleoductos hasta las instalaciones de almacenamiento, transporte de gas a la planta procesadora, procesamiento de gases, almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> procedente del procesamiento de gas natural, operaciones mineras que impliquen la recuperación de hidrocarburos [5]. La [Tabla 3.3](#) muestra los datos del inventario unitario principal que se utilizó para calcular el inventario total del proyecto y el consumo de energía para la producción de petróleo crudo.

**Tabla 3.3: Extracción de petróleo crudo ICV [5]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Consumo energético	MJ/tn	1432
Petróleo crudo	kg/tn	3.6
Gas natural	kg/tn	24
Electricidad	kW/tn	33.4
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	90139
CO	g/tn	12
SO <sub>2</sub>	g/tn	395
NO <sub>x</sub>	g/tn	250
CH <sub>4</sub>	g/tn	376
COVNM	g/tn	326
Partículas PM	g/tn	16

El ligante asfáltico apto para pavimentación se produce a partir de la destilación atmosférica a medida que el residuo de petróleo crudo se destila a través de una torre de vacío. Los factores de emisión y consumo de energía provienen del manejo de petróleo crudo, desalación, quema, área de carga y calefacción [5]. La [Tabla 3.4](#) resume los factores de emisión y el consumo total de energía por tonelada de asfalto.

**Tabla 3.4: Producción del asfalto convencional en refinería ICV [5]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Consumo energético	MJ/tn	315
Combustible de aceites pesados	kg/tn	1.05
Gas de refinería	kg/tn	5.53
Electricidad	kW/tn	N/A
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	18814
CO	g/tn	5.1
SO <sub>2</sub>	g/tn	45
NO <sub>x</sub>	g/tn	19
CH <sub>4</sub>	g/tn	2.9
COVNM	g/tn	2.4
Partículas PM	g/tn	3.8

Después de la producción de asfalto, el mismo se transfiere a un tanque de almacenamiento manteniendo su temperatura utilizando energía eléctrica. El consumo se utiliza principalmente para hacer circular el ligante constantemente y para cargarlo a través de una bomba eléctrica [5]. Los datos de la unidad de inventario y el consumo total de energía se muestran en la [Tabla 3.5](#).

**Tabla 3.5: Almacenamiento del asfalto convencional ICV [5]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Consumo energético	MJ/tn	100
Combustible de aceites pesados	kg/tn	0.47
Gas de refinería	kg/tn	1.45
Electricidad	kW/tn	2.69
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	6595
CO	g/tn	2
SO <sub>2</sub>	g/tn	22
NO <sub>x</sub>	g/tn	8
CH <sub>4</sub>	g/tn	2.6
COVNM	g/tn	0.91
Partículas PM	g/tn	3

### 3.4.1.2 Ligante asfáltico modificado con polímeros

En el ICV del ligante asfáltico con polímeros se asume que para moler el polímero hasta convertirlo en ligante se utiliza un molino de alto cizallamiento, accionado por electricidad. Se supone que el polímero se produce a 500km de la refinería [6]. En la [Tabla 3.6](#) se muestran los datos de inventario.

**Tabla 3.6: Asfalto modificado con polímeros ICV [6]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Materia prima</i>		
Petróleo crudo	kg/tn	988
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Gas natural	kg/tn	52.3
Petróleo crudo	kg/tn	69.1
Carbón	kg/tn	18.0
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	346016
SO <sub>2</sub>	g/tn	1744
NO <sub>x</sub>	g/tn	1734
CO	g/tn	1083

	Unidad de medida	Dato de inventario
CH <sub>4</sub>	g/tn	1205
HAP		1068
COVNM	g/tn	401
Partículas PM	g/tn	400

### 3.4.1.3 Producción de agregados

Los datos de inventario de agregado grueso y fino incluyen los procesos de extracción, trituración y molido [7]. La [Tabla 3.7](#) muestra los datos del inventario de emisiones al aire y consumo de energía de la producción de agregados finos y gruesos.

**Tabla 3.7: Producción de agregados ICV [7]**

	Unidad de medida	Dato de inventario	
		Agregado fino	Agregado grueso
Consumo de recursos energéticos			
Combustible Diesel	MJ/tn	29.4	29.4
Electricidad	MJ/tn	34.3	11.8
Emisiones al aire			
CO <sub>2</sub>	g/tn	4.4117	3.5774
CO	g/tn	27.6432	22.4158
SO <sub>2</sub>	g/tn	6.34648	5.1612
NO <sub>x</sub>	g/tn	50.3568	20.8342
COV	g/tn	5.4226	4.3971
COVNM	g/tn	4.0685	3.2991
CH <sub>4</sub>	g/tn	1.3541	1.098
Partículas PM	g/tn	50	50

### 3.4.1.4 Producción de cemento

Los datos del análisis de inventario de cemento se muestran en la [Tabla 3.8](#).

**Tabla 3.8: Producción de cemento ICV [8]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Combustibles pétreos	MJ/tn	65.60
Biomasa	MJ/tn	17.60
Gas natural	MJ/tn	3.63
Electricidad	MJ/tn	390
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	806000
CO	g/tn	0.82
SO <sub>2</sub>	g/tn	1000
NO <sub>x</sub>	g/tn	2000
COV	g/tn	0.429
CH <sub>4</sub>	g/tn	0.0546
N <sub>2</sub> O	g/tn	9840
Partículas PM	g/tn	27.3

### 3.4.1.5 Producción de varillas de acero para armadura

La utilización directa del acero es en barras de refuerzo para el pavimento de hormigón convencional. Los datos para el acero y el acero galvanizado en caliente se presentan en la [Tabla 3.9](#).

**Tabla 3.9: Varillas de acero ICV [8]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Diesel	MJ/tn	3360
Carbón	MJ/tn	15300
Gas natural	MJ/tn	1810
Electricidad	MJ/tn	4720
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	6595
CO	g/tn	2
SO <sub>2</sub>	g/tn	22
NO <sub>x</sub>	g/tn	8
N <sub>2</sub> O	g/tn	30.6
COVNM	g/tn	1120
CH <sub>4</sub>	g/tn	9170
Partículas PM	g/tn	39200

#### 3.4.1.6 Producción de fibras sintéticas de polietileno

Los datos sobre consumo de energía, uso de materiales y emisiones de la [Tabla 3.10](#) representan un promedio de todas las plantas de craqueo europeas y 36 plantas de polimerización de etileno. Los datos dan los valores totales para la producción de 1 tn de plástico de polietileno, desde la extracción de la materia prima hasta el producto final. El consumo de energía muestra el uso total, es decir, el consumo de energía en los procesos de producción, así como el consumo de materias primas hasta el propio material plástico, que se incluye en el producto y se cuenta como materia prima [8].

**Tabla 3.10: Fibras de polietileno ICV [8]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Diesel	MJ/tn	35340
Carbón	MJ/tn	2750
Gas natural	MJ/tn	11530
Electricidad	MJ/tn	7890
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	1100000
CO	g/tn	800
SO <sub>x</sub>	g/tn	7000
HAP	g/tn	21000
Partículas PM	g/tn	2000

#### 3.4.2 Producción de Mezclas y Capas Granulares

##### 3.4.2.1 Producción de Mezcla Asfáltica en Caliente

Los datos primarios del inventario se basan en el proceso de producción de la planta de mezcla asfáltica en caliente, principalmente calentando los agregados utilizando combustible pesado con un contenido de azufre de alrededor del 0,1 %, mezclado luego con el ligante asfáltico [8]. La [Tabla 3.11](#) muestra el análisis de datos de inventario y consumo de energía para el proceso de producción de la planta de asfalto caliente.

**Tabla 3.11: Producción de mezcla asfáltica en caliente ICV [8]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Diesel	MJ/tn	370
Biomasa	MJ/tn	3.19
Carbón	MJ/tn	2.84
Gas natural	MJ/tn	107
Electricidad	MJ/tn	71
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/tn	34400
CO	g/tn	11.80
SO <sub>2</sub>	g/tn	52
NO <sub>x</sub>	g/tn	119
N <sub>2</sub> O	g/tn	0.0518
COV	g/tn	12.9
CH <sub>4</sub>	g/tn	0.0107
Partículas PM	g/tn	497

### 3.4.2.2 Producción de Mezcla de Hormigón

La mezcla final de los diferentes componentes del hormigón realiza en una planta mezcladora. Allí se mezclan principalmente cemento, grava/arena, agregados triturados y agua, en proporciones predeterminadas. El uso de materiales y el consumo de energía se muestran en la [Tabla 3.12](#). Para este análisis no se incluyeron aditivos ni agua.

**Tabla 3.12: Materiales y uso energético en la producción de hormigón**

Material	Unidad de medida	Cantidad por m3 de hormigón
Cemento Portland	kg	350
Agregados triturados	kg	1050
Arena	kg	612.5
Diesel	MJ	42.53
Electricidad	MJ	14.63

El análisis de la producción de hormigón se basa en el hecho de que los datos del ICV para la producción de cemento, agregados triturados y la arena se han pesado junto con el consumo de energía de la planta mezcladora, que se puede dividir en consumo de electricidad y consumo de Diesel. Se ha supuesto que el consumo se produce mediante la combustión en un motor de bajas emisiones para un vehículo de mantenimiento. Los cálculos se han basado en las emisiones y el consumo de energía por unidad de volumen de hormigón producida. Los datos de inventario considerados en [3.4.1.3 Producción de agregados](#) y en [3.4.1.4 Producción de cemento](#) son considerados en el análisis.

### 3.4.2.3 Producción de base granular virgen

La mezcla final de los diferentes componentes de la base granular se realiza en una planta de suelos. Allí se mezclan principalmente grava/arena y agregados triturados, en proporciones que se muestran en la [Tabla 3.13](#), establecida para una franja granulométrica que cumpla con las especificaciones de base granular virgen CBR 100%.

**Tabla 3.13: Materiales en la producción de base granular virgen**

Material	Unidad de medida	Cantidad por m3 de hormigón
Agregados	kg	679.25
Grava natural	kg	1132.08
Arena	kg	521.68

Los datos de inventario de la capa de base granular virgen consideró los materiales que se tratan en el ítem [3.4.1.3 Producción de agregados](#).

#### 3.4.2.4 Sub-base de reciclado estabilizado con cemento

Los componentes de la sub-base de reciclado con estabilizado de cemento rc: 20kg/cm<sup>2</sup> se mezclan, en proporciones que se muestran en la [Tabla 3.14](#), considerando un 25% de aporte virgen.

**Tabla 3.14: Materiales en la producción de sub-base de reciclado estabilizado con cemento**

Material	Unidad de medida	Cantidad por m3 de hormigón
Agregado virgen	kg	566.04
Grava natural	kg	68.85
Arena	kg	1698.11
Cemento	kg	93.32
Diesel	litros	1.034

Los datos de inventario de la capa de base granular virgen consideró los materiales que se tratan en el ítem [3.4.1.3 Producción de agregados](#) y [3.4.1.4 Producción de cemento](#).

### 3.4.3 Construcción

#### 3.4.3.1 Pavimento flexible

Los datos del ICV de construcción se centraron principalmente en el tipo de maquinaria utilizada, el consumo de combustible y las emisiones [8]. La [Tabla 3.15](#) resume los detalles de los tipos de maquinaria utilizados en la fase de construcción. Los datos del inventario para el pavimento asfáltico se muestran en la [Tabla 3.16](#).

**Tabla 3.15: Especificaciones de equipos para construcción de pavimento asfáltico [8]**

Especificaciones		
<i>Extendedora asfáltica Dynapac F16</i>		
Velocidad	m/h	240
Ancho de pavimentación	m	6.5
Consumo de Diesel	MJ/m <sup>2</sup>	0.594
<i>Compactadora Dynapac CC 421</i>		
Velocidad	km/h	4
Ancho de tambor	m	1.675
Nro. de pasadas	-	6
Consumo de Diesel	MJ/m <sup>2</sup>	0.7988

**Tabla 3.16: Equipos para construcción de pavimento asfáltico ICV [8]**

Emisiones al aire		
<i>Extendedora asfáltica Dynapac F16</i>		
CO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.0469
CO	g/m <sup>2</sup>	0.0506
SO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.0226
N <sub>2</sub> O	g/m <sup>2</sup>	0.00095
NO <sub>x</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.4240
COVNM	g/m <sup>2</sup>	0.0305
HPA	g/m <sup>2</sup>	0.0305
CH <sub>4</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.0000297
Partículas PM	g/m <sup>2</sup>	0.0169

Emisiones al aire		
<i>Compactadora Dynapac CC 421</i>		
CO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	63.1
CO	g/m <sup>2</sup>	0.068
SO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.0304
N <sub>2</sub> O	g/m <sup>2</sup>	0.0013
NO <sub>x</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.5700
COVNM	g/m <sup>2</sup>	0.0411
HPA	g/m <sup>2</sup>	0.0411
CH <sub>4</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.00004
Partículas PM	g/m <sup>2</sup>	0.0227

### 3.4.3.2 Pavimentos rígidos

Al colocar hormigón en pavimentos rígidos, se utiliza una extendidora deslizante que cubre todo el ancho de plataforma, (ancho total estándar 9m). En el análisis de inventario del proceso de hormigonado se incluyen datos del consumo energético de la extendidora deslizante [8]. El resultado del análisis del inventario para la construcción de pavimentos rígidos se muestra en la [Tabla 3.17](#).

No se incluyó la colocación de refuerzos, sino que cálculo fue realizado como un valor incorporado al pavimento, utilizando los datos de materiales en [3.4.1.5 Producción de varillas de acero para armadura](#) (26,25 kg de acero por m<sup>3</sup> de pavimento rígido convencional) y [3.4.1.6 Producción de fibras sintéticas de polietileno](#) (3 kg de fibras por m<sup>3</sup> de pavimento rígido reforzado con fibras).

**Tabla 3.17: Construcción de pavimentos rígidos ICV [8]**

	Unidad de medida	Dato de inventario
<i>Consumo de recursos energéticos</i>		
Diesel	MJ/m <sup>2</sup>	4.53
<i>Emisiones al aire</i>		
CO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	326
CO	g/m <sup>2</sup>	0.351
SO <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.157
NO <sub>x</sub>	g/m <sup>2</sup>	2.94
N <sub>2</sub> O	g/m <sup>2</sup>	0.00659
COVNM	g/m <sup>2</sup>	0.212
CH <sub>4</sub>	g/m <sup>2</sup>	0.00021
Partículas PM	g/m <sup>2</sup>	0.117

### 3.4.4 Mantenimiento

El mantenimiento para el pavimento flexible consiste en un recapado de 5 cm de espesor con concreto asfáltico modificado con polímeros a los 10 años de su puesta en servicio. Por lo tanto, los datos de inventario presentados en los ítems [3.4.1.2. Ligante asfáltico modificado con polímeros](#), [3.4.2.1 Producción de Mezcla Asfáltica en Caliente](#), [3.4.3.1 Pavimento flexible](#) son considerados para esta etapa del sistema.



### 3.5 Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV)

El objetivo principal de la fase de evaluación de impacto del ciclo de vida (AICV) es identificar la importancia de los posibles efectos ambientales utilizando los resultados de entrada y salida de la etapa de inventario ICV. En general, los datos debían clasificarse en impacto ambiental e indicadores. Este estudio investigó los posibles efectos ambientales de las fases del ciclo de vida de los pavimentos flexibles y rígidos. Los datos del inventario fueron convertidos a la categoría de impacto correspondiente utilizando los factores equivalentes. Las categorías impactadas consideradas en esta investigación se muestran en la [Tabla 3.18](#).

**Tabla 3.18: Factores de categorías de impacto [9]**

Categoría de impacto	Sustancia	Factor unitario	Factor
Potencial de calentamiento global (GWP 100 años)	CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub> -eq./kg (100 años)	1
	N <sub>2</sub> O		23
	CH <sub>4</sub>		296
Acidificación (AP)	NO <sub>x</sub>	kg SO <sub>2</sub> -eq./kg	1.77
	SO <sub>2</sub>		1
	NH <sub>3</sub>		1.88
Eutrofización (EP)	NO <sub>x</sub>	kg PO <sub>4</sub> -eq./kg	0.33
	NH <sub>3</sub>		0.35
Toxicidad Humana (TH)	SO <sub>2</sub>	kg 1,4DCB-eq./kg	9.60E-02
	NO <sub>x</sub>	DCB: diclorobenceno	1.20E+00
	CO		2.40E+00
	NH <sub>3</sub>		1.00E-01
	COVNM		6.40E-01
	HAP		8.10E+00
	Partículas PM		8.20E-01
Eco-toxicidad:	COVNM	kg 1,4DCB-eq./kg	
	a. PETMA <sup>(1)</sup>	DCB: diclorobenceno	a. 5.20E-11
	b. PETSAD <sup>(2)</sup>		b. 6.40E-11
	c. PETSM <sup>(3)</sup>		c. 1.00E-12
Uso de combustibles fósiles	Energía	MJ	1

<sup>(1)</sup> PETMA es el potencial de ecotoxicidad marina acuática.

<sup>(2)</sup> PETSAD es el potencial de ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce.

<sup>(3)</sup> PETSM es el potencial de ecotoxicidad de sedimentos marinos.

## 4 RESULTADOS

Los resultados individuales de las sustancias emitidas al aire y el consumo energético para cada alternativa de pavimento se muestran en la [Tabla 4.1](#). Los resultados se resaltan en color rojo para el mayor valor obtenido, en color verde, para el menor valor, y en color amarillo, para el valor intermedio. No obstante, estos valores deben ser analizados por categoría de impacto en el caso de emisiones, debido a que no todas las sustancias impactan en igual magnitud. Para ello, se utiliza los factores de categoría presentados anteriormente en la [Tabla 3.18](#).

**Tabla 4.1: Resultados de emisiones al aire y consumo energético para todas las alternativas**

	Pavimento Flexible Asfáltico	Pavimento Rígido Convencional	Pavimento Rígido con Fibras
<i>Emisiones al aire</i>			
CO <sub>2</sub>	5.65E+08	8.53E+08	5.08E+08
CO	9.92E+05	2.00E+05	8.06E+04
SO <sub>2</sub>	1.86E+06	1.25E+06	6.48E+05
N <sub>2</sub> O	2.02E+06	8.34E+06	6.19E+06
NO <sub>x</sub>	2.32E+06	2.11E+06	1.37E+06
CH <sub>4</sub>	1.04E+06	4.62E+05	3.87E+03
COVNM	3.64E+05	7.41E+04	1.26E+04
HAP	9.10E+05	1.05E+06	1.22E+03
Partículas PM	4.17E+05	2.30E+06	1.82E+05
<b>Total emisiones:</b>	<b>5.75E+08</b>	<b>8.69E+08</b>	<b>5.17E+08</b>
<i>Consumo energético</i>			
<b>Total energía (MJ):</b>	<b>4.30E+07</b>	<b>4.77E+06</b>	<b>4.96E+05</b>

Los resultados totales de las seis (6) categorías de impacto ambiental analizadas se presentan a continuación, incluyendo el consumo energético. Los valores obtenidos representan los efectos medioambientales incorporados a los tres tipos de pavimentos en estudio, considerando las fases del ciclo de vida descritas anteriormente. Los resultados se resaltan en color rojo para el mayor valor obtenido, en color verde, para el menor valor, y en color amarillo, para el valor intermedio. El detalle de valores obtenidos en el análisis de impacto del ciclo de vida se presenta en el Anexo.

### 4.1 Potencial de Calentamiento Global (GWP<sub>100</sub>)

Las principales sustancias que podrían afectar el potencial de calentamiento global después de 100 años (GWP<sub>100</sub>) son el CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> [10]. Los resultados se presentan la unidad de medida kg CO<sub>2</sub>-eq. La [Tabla 4.2](#) muestra los resultados totales de GWP para todas las fases consideradas.

**Tabla 4.2: Resultados de potencial de calentamiento global en kg CO<sub>2</sub>-eq.**

Potencial de Calentamiento Global (GWP <sub>100</sub> )			
	Pavimento Flexible Asfáltico	Pavimento Rígido Convencional	Pavimento Rígido con Fibras
CO <sub>2</sub>	5.65E+08	8.53E+08	5.08E+08
N <sub>2</sub> O	4.65E+07	1.92E+08	1.42E+08
CH <sub>4</sub>	3.08E+08	1.37E+08	1.14E+06
<b>GWP<sub>100</sub> Total: (kg CO<sub>2</sub>-eq.)</b>	<b>9.20E+08</b>	<b>1.18E+09</b>	<b>6.52E+08</b>

Los resultados muestran que el mayor potencial de calentamiento global en 100 años entre las tres alternativas corresponde al pavimento rígido convencional, siendo un 28% mayor que el valor obtenido para el pavimento flexible, y 57% mayor que el del pavimento rígido con fibras.

#### 4.2 Potencial de Acidificación (AP)

Las principales sustancias que influyen en el potencial de acidificación (AP) en este estudio son el SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Los resultados se presentan la unidad de medida kg SO<sub>2</sub>-eq. La [Tabla 4.3](#) muestra los resultados totales de AP para todas las fases consideradas.

**Tabla 4.3: Resultados de potencial de acidificación en kg SO<sub>2</sub>-eq.**

Potencial de Acidificación (AP)			
	<i>Pavimento Flexible Asfáltico</i>	<i>Pavimento Rígido Convencional</i>	<i>Pavimento Rígido con Fibras</i>
SO <sub>2</sub>	4.11E+06	3.74E+06	2.42E+06
NO <sub>x</sub>	1.86E+06	1.25E+06	6.48E+05
<b>AP Total: (kg SO<sub>2</sub>-eq.)</b>	<b>5.97E+06</b>	<b>4.98E+06</b>	<b>3.07E+06</b>

Los resultados muestran que el mayor potencial de acidificación entre las tres alternativas corresponde al pavimento flexible, siendo un 17% mayor que el valor obtenido para el pavimento rígido convencional, y 49% mayor que el del pavimento rígido con fibras.

#### 4.3 Potencial de Eutrofización (EP)

El impacto de la eutrofización en este estudio está caracterizado por la sustancia NO<sub>x</sub>. Los resultados se presentan la unidad de medida kg PO<sub>4</sub>-eq. La [Tabla 4.4](#) muestra los resultados totales de EP para todas las fases consideradas.

**Tabla 4.4: Resultados de potencial de eutrofización en kg PO<sub>4</sub>-eq.**

Potencial de Eutrofización (EP)			
	<i>Pavimento Flexible Asfáltico</i>	<i>Pavimento Rígido Convencional</i>	<i>Pavimento Rígido con Fibras</i>
NO <sub>x</sub>	7.67E+05	6.97E+05	4.51E+05
<b>EP Total: (kg PO<sub>4</sub>-eq.)</b>	<b>7.67E+05</b>	<b>6.97E+05</b>	<b>4.51E+05</b>

Los resultados muestran que el mayor potencial de eutrofización entre las tres alternativas corresponde pavimento flexible, siendo un 8% mayor que el valor obtenido para el pavimento rígido convencional, y 41% mayor que el del pavimento rígido con fibras.

#### 4.4 Toxicidad Humana (TH)

Las principales sustancias que pueden aumentar el impacto de la toxicidad humana son el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, compuestos orgánicos volátiles no metano (COVNM), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y partículas de polvo. Los resultados se presentan la unidad de medida kg 1,4DCB-eq (1,4 diclorobenceno equivalente). La [Tabla 4.5](#) muestra los resultados totales de TH para todas las fases consideradas.

**Tabla 4.5: Resultados de toxicidad humana en kg 1,4DCB-eq.**

Toxicidad Humana (TH)			
	<i>Pavimento Flexible Asfáltico</i>	<i>Pavimento Rígido Convencional</i>	<i>Pavimento Rígido con Fibras</i>
SO <sub>2</sub>	1.79E+05	1.20E+05	6.22E+04
NO <sub>x</sub>	2.79E+06	2.53E+06	1.64E+06
CO	2.38E+06	4.80E+05	1.93E+05
COVNM	2.33E+05	4.75E+04	8.08E+03
HAP	7.37E+06	8.48E+06	9.87E+03
Partículas	3.42E+05	1.88E+06	1.49E+05
<b>TH Total: (kg 1,4DCB-eq.)</b>	<b>1.33E+07</b>	<b>1.35E+07</b>	<b>2.06E+06</b>

Los resultados muestran que la mayor toxicidad humana entre las tres alternativas corresponde al pavimento rígido convencional, siendo un 2% mayor que el valor obtenido para el pavimento flexible, y 86% mayor que el del pavimento rígido con fibras.

#### 4.5 Eco-toxicidad

El impacto de la ecotoxicidad se evaluó en función de tres subcategorías: potencial de ecotoxicidad acuática marina potencial de ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce, y potencial de ecotoxicidad de sedimentos marinos MSETP. Las principales sustancias que pueden afectar a estas subcategorías son los compuestos orgánicos volátiles no metano (COVNM). Los resultados se presentan la unidad de medida kg 1,4DCB-eq (1,4 diclorobenceno equivalente). La [Tabla 4.6](#) muestra los resultados totales de eco-toxicidad para todas las fases consideradas.

**Tabla 4.6: Resultados de eco-toxicidad en kg 1,4DCB-eq.**

Eco-toxicidad			
	Pavimento Flexible Asfáltico	Pavimento Rígido Convencional	Pavimento Rígido con Fibras
COVNM PETMA	1.89E-05	3.86E-06	6.56E-07
COVNM PETSAD	2.33E-05	4.75E-06	8.08E-07
COVNM PETSMT	3.64E-07	7.41E-08	1.26E-08
<b>Eco-toxicidad Total: (kg 1,4DCB-eq.)</b>	<b>4.25E-05</b>	<b>8.67E-06</b>	<b>1.48E-06</b>

Los resultados muestran que el mayor potencial de eco-toxicidad entre las tres alternativas corresponde pavimento flexible, siendo un 80% mayor que el valor obtenido para el pavimento rígido convencional, y 97% mayor que el del pavimento rígido con fibras.

#### 4.6 Consumo energético

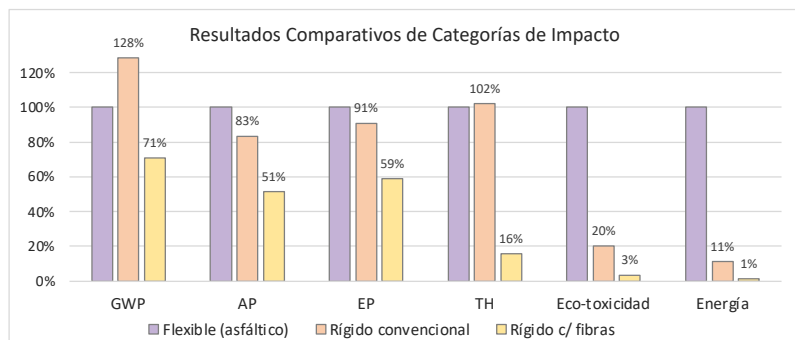
El consumo total de energía requerido para las tres alternativas en las fases estudiadas se muestra en la [Tabla 4.7](#). Los resultados se presentan la unidad de medida MJ.

**Tabla 4.7: Resultados de consumo energético en MJ.**

Consumo Energético			
	Pavimento Flexible Asfáltico	Pavimento Rígido Convencional	Pavimento Rígido con Fibras
<b>Energía Total: (MJ)</b>	<b>4.30E+07</b>	<b>4.77E+06</b>	<b>4.96E+05</b>

Los resultados muestran que el mayor consumo energético requerido entre las tres alternativas corresponde pavimento flexible, siendo un 89% mayor que el valor obtenido para el pavimento rígido convencional, y 99% mayor que el del pavimento rígido con fibras. En la [Figura 4.1](#) se muestran los resultados comparativos en porcentaje, donde el 100% corresponde al pavimento flexible.

Se debe destacar que el **GWP** es la categoría de mayor impacto en emisiones al aire, evidenciado por los valores presentados anteriormente. En el caso del consumo energético, se debe mirar de forma separada a las demás categorías, puesto que no representa la emisión de sustancias al aire, sino que se trata del uso o agotamiento de los combustibles fósiles.



**Figura 4.1: Resultados comparativos de categorías de impacto**

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el presente estudio de investigación se analizó el impacto ambiental de las alternativas propuestas para la rehabilitación de la Ruta PY05, Tramo: Pozo Colorado – Concepción, Lote 2 y 3, pre puente Nanawa. Las alternativas consisten en tres tipos de pavimento: asfáltico o flexible, rígido convencional o con hormigón convencional, y rígido con fibras o con hormigón reforzado con fibras. El análisis se desarrolló utilizando el método de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) según las recomendaciones de la Organización Internacional de Normalización (ISO): ISO 14040: 2020 e ISO 14044:2018.

Los principales materiales considerados para la construcción del pavimento flexible fueron la capa de concreto asfáltico modificado con polímeros, la base de concreto asfáltico convencional, y la base granular virgen; para la del pavimento rígido convencional, la losa convencional de hormigón armado; y en la del pavimento rígido con fibras, la losa de hormigón reforzado con fibras. En los tres tipos de pavimento se consideró una sub-base de reciclado (RAP+BG) y estabilizada con cemento, sin embargo, el impacto o efecto ambiental del reciclado no fue considerado en el presente estudio, incluyendo las maquinarias necesarias para su obtención o extracción del pavimento existente. Las capas de apoyo no fueron consideradas para ninguna alternativa.

La clave para utilizar la herramienta de ACV es decidir la idoneidad de los materiales secundarios en la industria de los pavimentos mediante la revisión de varios impactos ambientales en diferentes etapas del proceso, tales como la producción de material, el transporte, la producción, la construcción y el mantenimiento. El modelo debe ser lo suficientemente flexible para efectuar cualquier cambio, como agregar o eliminar cualquier objeto en caso de estudio de cualquier pavimento específico. En este caso, no fueron incluidas las fases de transporte ni el componente agua. El transporte marítimo es uno de los que más influye en la producción de asfalto, por lo tanto, se recomienda realizar una verificación de sensibilidad para investigar el impacto y la variación de datos.

Los datos de inventario del ciclo de vida (ICV) primarios provienen principalmente de una combinación de estándares de agencias ambientales europeas e instituciones de investigación como 'Athena Institute' y 'Swedish Environmental Research Institute'.

Se evaluaron seis (6) categorías de impacto ambiental, incluyendo consumo de energía, con el fin de obtener valores representativos del efecto ambiental incorporado a los tres tipos de pavimentos. Las emisiones al aire fueron consideradas en este estudio, no así las emisiones al agua.

El análisis consideró las fases de extracción/obtención de materia prima, fabricación o producción de materiales, construcción del pavimento, y mantenimiento (exclusivo para el pavimento asfáltico o flexible). No fueron incluidas las fases de uso y la reutilización o demolición y disposición final.

Los principales hallazgos del ACV se resumen en que el mayor consumo de energía de todas las fases del modelo corresponde al pavimento flexible o asfáltico, debido principalmente a las emisiones relacionadas con la extracción del petróleo crudo y las altas temperaturas utilizadas en el proceso de producción de las mezclas asfálticas. En cuanto a las demás categorías de impacto, el pavimento rígido convencional es el mayor emisor de sustancias tóxicas en cuanto al potencial de calentamiento global en 100 años (GWP<sub>100</sub>), representado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente. En todos los casos, el menor impacto es producido por la construcción del pavimento rígido con fibras, debido principalmente al espesor de losa y la cantidad de refuerzo requerido por metro cúbico de hormigón.

Para alcanzar la precisión de la recopilación de datos, se puede utilizar más de un recurso para la determinación del inventario del modelo ACV, ya que el uso de esta herramienta en la industria vial es relativamente reciente. Por lo tanto, es crucial investigar la compatibilidad con las condiciones locales, los supuestos subyacentes y los límites, y, además, se resalta la importancia de investigar el impacto del uso de energías renovables y si existe una reducción aparente de las emisiones en comparación con otras fuentes de energía. Finalmente, se recomienda añadir el componente de reciclaje en la etapa final de la vida del pavimento y la posibilidad de reutilizarlo o eliminarlo en vertederos como residuo de la construcción.

## 5.1 MATRIZ MULTICRITERIO

Los datos asociados a los aspecto técnicos, económicos, ambientales y constructivos, se presentan resumidos en la matriz multicriterio que se muestra en la *Figura 5.1*, la cual pondera cada uno de los aspectos evaluados, proporcionando una visión comprensiva y equilibrada de las alternativas. Esta matriz se presenta con el fin de contar con una visión general de los valores finales asociados a cada una de las alternativas de pavimentos estudiadas, tanto de flexible como rígido.

ASPECTOS	Flexible	Hormigón Convencional	Hormigón Losas Geometría Opt.	Consideración																																																												
Pavimento Estructural y Funcional (Técnico)	Estruc: + Func: +++	Estruc: +++ Func: +	Estruc: +++ Func: ++	Estructural: p/un Horizonte de 20años, el Flexible necesitará de un recapado (5cm) entre los años 8 y 12  Funcional: el IRI exigible para el Flexible (2m/km) no puede ser el mismo que para el Hormigón (2,5m/km)_Caso Py Relevancia del Alabeo																																																												
Estimación de Costos_ \$	<table><thead><tr><th rowspan="2">Tipo de Pavimento</th><th colspan="3">10 años</th><th colspan="3">20 años</th></tr><tr><th>Longitud</th><th>90,2 km</th><th>USD</th><th>USD/km</th><th>%</th><th>USD</th><th>USD/km</th><th>%</th></tr></thead><tbody><tr><td>Alt 1 - Flexible (verifica x capa) 7+7+15+15</td><td></td><td></td><td>53.464.591</td><td>592.734</td><td>100%</td><td>64.860.407</td><td>719.073</td><td>100%</td></tr><tr><td>Alt 2 - Rígido Convencional 22+15+15</td><td></td><td></td><td>56.889.978</td><td>630.709</td><td>106%</td><td>56.889.978</td><td>630.709</td><td>88%</td></tr><tr><td>Alt 3 - Rígido con fibras 17+15+15</td><td></td><td></td><td>50.389.556</td><td>558.643</td><td>94%</td><td>50.389.556</td><td>558.643</td><td>78%</td></tr><tr><td colspan="6">Precio OBRA_USD</td><td>69.161.585</td><td colspan="2"></td></tr><tr><td colspan="6"></td><td>72.817.707</td><td colspan="2"></td></tr></tbody></table>			Tipo de Pavimento	10 años			20 años			Longitud	90,2 km	USD	USD/km	%	USD	USD/km	%	Alt 1 - Flexible (verifica x capa) 7+7+15+15			53.464.591	592.734	100%	64.860.407	719.073	100%	Alt 2 - Rígido Convencional 22+15+15			56.889.978	630.709	106%	56.889.978	630.709	88%	Alt 3 - Rígido con fibras 17+15+15			50.389.556	558.643	94%	50.389.556	558.643	78%	Precio OBRA_USD						69.161.585									72.817.707			No se ha considerando intervenciones en el pavimento en el tiempo
Tipo de Pavimento	10 años				20 años																																																											
	Longitud	90,2 km	USD	USD/km	%	USD	USD/km	%																																																								
Alt 1 - Flexible (verifica x capa) 7+7+15+15			53.464.591	592.734	100%	64.860.407	719.073	100%																																																								
Alt 2 - Rígido Convencional 22+15+15			56.889.978	630.709	106%	56.889.978	630.709	88%																																																								
Alt 3 - Rígido con fibras 17+15+15			50.389.556	558.643	94%	50.389.556	558.643	78%																																																								
Precio OBRA_USD						69.161.585																																																										
						72.817.707																																																										
Constructivos (c) y mantenimiento (M)	Const: +++ Manten: +	Const: + Manten: +++ F(Método constructivo). Tiempos endurecimiento (7 a 14 días)	Const: + Manten: +++ F(Método constructivo). Tiempos endurecimiento (7 a 14 días)	Constructiva: indudable la experiencia local en flexible, no así en Rígido. Debe considerarse los equipos y uso (pavimentadora y planta, así como el mismo H)  Funcional: las reparaciones en el Flexible se espera sean mayores en frecuencia y \$, sin embargo un mal pavimento rígido implica cepillado o reemplazo.																																																												
Ambientales (Ciclo de Vida)	<table><caption>Resultados Comparativos de Categorías de Impacto</caption><thead><tr><th>Categoría</th><th>Flexible (asfáltico)</th><th>Rígido convencional</th><th>Rígido c/ fibras</th></tr></thead><tbody><tr><td>GWP</td><td>128%</td><td>91%</td><td>71%</td></tr><tr><td>AP</td><td>83%</td><td>51%</td><td>51%</td></tr><tr><td>EP</td><td>92%</td><td>38%</td><td>38%</td></tr><tr><td>TH</td><td>102%</td><td>18%</td><td>18%</td></tr><tr><td>Eco-toxicidad</td><td>20%</td><td>3%</td><td>3%</td></tr><tr><td>Energía</td><td>13%</td><td>3%</td><td>3%</td></tr></tbody></table> <p>Figura 4.1: Resultados comparativos de categorías de impacto</p>			Categoría	Flexible (asfáltico)	Rígido convencional	Rígido c/ fibras	GWP	128%	91%	71%	AP	83%	51%	51%	EP	92%	38%	38%	TH	102%	18%	18%	Eco-toxicidad	20%	3%	3%	Energía	13%	3%	3%	Los principales hallazgos del ACV se resumen en que el mayor consumo de energía de todas las fases del modelo corresponde al pavimento flexible o asfáltico, debido principalmente a las emisiones relacionadas con la extracción del petróleo crudo y las altas temperaturas utilizadas en el proceso de producción de las mezclas asfálticas. En cuanto a las demás categorías de impacto, el pavimento rígido convencional es el mayor emisor de sustancias tóxicas en cuanto al potencial de calentamiento global en 100 años (GWP100), representado en kg de CO2 equivalente. En todos los casos, el menor impacto es producido por la construcción del pavimento rígido con fibras, debido principalmente al espesor de losa y la cantidad de refuerzo requerido por metro cúbico de hormigón.																																
Categoría	Flexible (asfáltico)	Rígido convencional	Rígido c/ fibras																																																													
GWP	128%	91%	71%																																																													
AP	83%	51%	51%																																																													
EP	92%	38%	38%																																																													
TH	102%	18%	18%																																																													
Eco-toxicidad	20%	3%	3%																																																													
Energía	13%	3%	3%																																																													

Figura 5.1: Matriz multicriterio de alternativas de pavimentación

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. L. Bishop, Pollution Prevention: Fundamentals and Practice, Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [2] European Platform of Life Cycle Assessment, «ILCD Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment. Detailed guidance,» European Union, Ispra, 2010.
- [3] European Platform of Life Cycle Assessment, «ILCD Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context,» European Union, Ispra, 2011.
- [4] ISO, «Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2020),» International Organization for Standardization, Geneva, 2020.
- [5] Eurobitume, «Life-Cycle Inventory for Bitumen,» European Bitumen Association, Bruselas, 2020.
- [6] Eurobitume, «Life Cycle Inventory: Bitumen,» European Bitumen Association, Bruselas, 2012.
- [7] Athena Institute, «A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential,» Cement Association of Canada, Ottawa, 2006.
- [8] H. Stripple, «Life Cycle Assessment of Road - a Pilot Study for Inventory Analysis,» Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, 2001.
- [9] A. Ciroth, M. Srocka y J. Hildenbrand, «OpenLCA,» GreenDelta, Berlin, 2023.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change, «Sixth Assessment Report (AR6) "Climate Change 2023",» IPCC, Geneva, 2023.
- [11] M. Eckelman y S. Nunberg, «Life Cycle Assessment Explained,» Sustainability Tools in Cultural Heritage, 2024. [En línea]. Available: <https://stich.culturalheritage.org/life-cycle-assessment-explained/>.
- [12] European Platform on Life Cycle Assessment, «ILCD Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context,» European Union, Ispra, 2011.