

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL ASFALTO VERDE, ASFALTO MODIFICADO  
Y ASFALTO CONVENCIONAL EN COSTA RICA, A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE  
VIDA COMO UN APOORTE PARA LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA  
DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

GABRIELA CERDAS ALVARADO  
B31697

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO  
SAN JOSÉ, COSTA RICA  
2020

EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL ASFALTO VERDE, ASFALTO MODIFICADO Y ASFALTO CONVENCIONAL EN COSTA RICA, A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO UN APOORTE PARA LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Informe de proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante:  
Gabriela Cerdas Alvarado

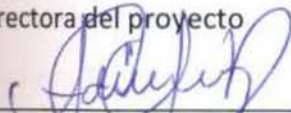
Aprobado por:



M.Sc. Randall Ramírez Loria  
Escuela de Ingeniería Química  
Presidente del tribunal



M.Sc. Alejandra Baldi Sevilla  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, UCR  
Directora del proyecto



Lic. Adriana Araya Díaz  
Escuela de Ingeniería Química, UCR  
Miembro lector



Dra. Jessica Roccard Pommera  
Observatorio del Desarrollo, UCR  
Miembro lector



Lic. Daybis Stuar Tencio González  
Escuela de Ingeniería Química  
Miembro invitado

Ciudad de la Investigación, San José, Costa Rica, 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por la oportunidad otorgada. A mi madre Maribel por apoyarme cada segundo y ser un gran ejemplo a seguir. A mi hermana Mariana por ser mi compañía durante los largos días de estudio. A mi padre Eduardo por brindarme palabras de aliento. A José por aconsejarme y motivarme a continuar. A Amanda por escucharme y estar pendiente de mi avance durante este camino.

A mi directora de proyecto, Alejandra Baldi, por extenderme la confianza de llevar a cabo esta investigación, por guiarme desde el inicio hasta el final, por la retroalimentación y por el aprendizaje que desarrollamos juntas. Asimismo, a Jessica Roccard y a Adriana Araya por toda la asesoría brindada.

A todos los colaboradores del LanammeUCR que me brindaron su apoyo durante el desarrollo de la investigación y, así como aquellas personas de las empresas involucradas en el estudio.

Todos ellos contribuyeron para alcanzar esta meta.

## RESUMEN

Este proyecto evaluó la huella de carbono de tres tipos de asfalto, a través de un análisis de ciclo de vida (ACV), brindando recomendaciones para la mitigación del cambio climático. El estudio se enfoca en la comparación de tres escenarios, con énfasis en la generación de información para la toma de decisiones y futura escalación de resultados a proyectos de mayores magnitudes.

Este trabajo se centra en los tramos construidos con mezcla asfáltica caliente en el LanammeUCR, Costa Rica. Se le llama asfalto convencional a la mezcla asfáltica con asfalto original (escenario 1), asfalto verde a la mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) reciclado (escenario 2) y, asfalto modificado a la mezcla asfáltica con Elvaloy y ácido polifosfórico (PPA) utilizando planta de combustible o planta eléctrica (escenario 3.1 y 3.2).

La investigación se divide en cuatro grandes secciones, primeramente se presenta el fundamento teórico, la delimitación del caso de estudio, el inventario del análisis de ciclo de vida incluyendo el desarrollo de la herramienta para cuantificar la huella de carbono, y el análisis de los resultados abarcando también comparaciones con otros ACV y alternativas para la mitigación del cambio climático. Los datos primarios se obtuvieron de cuestionario y, los datos secundarios de estudios previos y bases de datos.

Como resultado, la menor huella de carbono obtenida se presentó para el escenario 2 (asfalto verde) con un valor de 354,25 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla. Consecuentemente, se coloca el escenario 1 (asfalto original) con un valor de 354,25 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla, seguido del escenario 3.2 (asfalto modificado en planta eléctrica) con un valor de 357,05 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla. La mayor huella de carbono se mostró para el escenario 3.1 (asfalto modificado en planta de combustible) igual a 357,13 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla. Además, la mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultan de la etapa de producción de materia prima.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda la implementación de asfaltos verdes, específicamente utilizando PET reciclado como agente modificador, demostrando disminuciones en las emisiones de GEI como un aporte a la mitigación del cambio climático. Dentro de las posibles alternativas para aplicar en el país se identifica la incorporación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) a las mezclas asfálticas, y la disminución en las temperaturas de producción por medio de mezclas asfálticas tibias.

## ÍNDICE GENERAL

	Páginas
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – CASO ANÁLISIS DE VARIOS TIPOS DE ASFALTOS .....	4
1.1. Cambio climático .....	4
1.2. Efecto invernadero y gases de efecto invernadero (GEI).....	5
1.3. Mezclas asfálticas .....	6
1.3.1. Clasificación de mezclas asfálticas.....	7
1.3.2. Asfalto y modificaciones .....	9
1.3.3. Agregados .....	12
1.4. Pavimentos verdes.....	14
1.4.1. Residuos de polímeros.....	15
1.4.2. Materiales reciclados para incorporar en mezclas asfálticas .....	17
1.5. Huella de carbono como indicador .....	20
1.6. Herramientas de cuantificación de huella de carbono .....	23
1.7. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) .....	24
1.7.1. Familia de normas ISO 14040 .....	26
1.7.2. Enfoque del Análisis de Ciclo de Vida .....	27
1.7.3. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.....	28
1.7.4. Recopilación de datos.....	33
1.8. Estimación de huella de carbono y ACV en pavimentos .....	35
1.8.1. Delimitación de las etapas del ciclo de vida para mezclas asfálticas .....	35
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	39
2.1. Objetivos de la investigación .....	39
2.1.1. Objetivo General.....	39
2.1.2. Objetivos Específicos .....	39
2.2. Descripción del caso de estudio .....	39
2.2.1. Descripción de las empresas involucradas en el proyecto .....	41
2.3. Metodología general .....	42

2.4. Finalidad del ACV según la ISO 14040:2006.....	45
2.5. Alcance según la ISO 14040:2006 .....	47
<b>CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA PARA EL CASO DE ESTUDIO</b> .....	<b>53</b>
3.1. Identificación de fuentes de emisión (entradas y salidas).....	53
3.2. Recolección de datos para el inventario.....	55
3.2.1. Productos derivados del petróleo.....	55
3.2.2. Transporte marítimo del asfalto .....	58
3.2.3. Almacenamiento del asfalto sin modificar.....	59
3.2.4. Extracción y producción de agregados .....	60
3.2.5. Reprocesamiento de polímeros reciclados.....	60
3.2.6. Transporte de materiales.....	61
3.2.7. Generación de electricidad .....	62
3.2.8. Planta de modificación de asfalto.....	62
3.2.9. Producción de la mezcla asfáltica .....	64
3.2.10. Construcción de los tramos.....	67
3.3. Asignación de emisiones en los procesos requeridos .....	68
3.4. Datos del inventario para el caso de estudio.....	69
3.5. Modelamiento de los datos del inventario.....	73
3.5.1. Desarrollo de la herramienta para cuantificar la huella de carbono .....	74
3.5.2. Cuantificación de la huella de carbono.....	78
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETRACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA HUELLA DE</b> <b>CARBONO Y DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL CASO DE ESTUDIO</b> .....	<b>83</b>
4.1. Análisis de la huella de carbono para el caso de estudio .....	83
4.1.1. Análisis general de las etapas del ciclo de vida para diferentes tipos de asfaltos .....	87
4.1.2. Análisis de la fase de producción de materia prima .....	91
4.1.3. Comparación 1 kg PET versus 1 kg de Elvaloy y PPA.....	93
4.1.4. Comparación 1 kg agregados versus 1 kg PET .....	94
4.1.5. Comparación de 1 kg asfalto versus 1 kg Elvaloy y PPA.....	95

4.1.6. Huella de carbono para tramos en el LanammeUCR y caso hipotético de 1 km	96
4.1.7. Análisis del PET reciclado como agente modificador en un asfalto verde .....	98
4.2. Comparaciones de ACV de mezclas asfálticas con respecto al caso de estudio .....	100
4.2.1. Comparación de unidades funcionales para ACV de mezclas asfálticas .....	100
4.2.2. Comparación de las etapas del ciclo de vida estudiadas.....	104
4.2.3. Comparación de la huella de carbono de varios ACV para mezclas asfálticas.	106
4.3. Alternativas y consideraciones aplicadas al caso de estudio para la mitigación del cambio climático.....	117
4.3.1. Materiales alternativos en mezclas asfálticas .....	118
4.3.2. Cambios dentro del ciclo de vida de mezclas asfálticas para disminuir las emisiones de GEI.....	121
4.3.3. Aspectos económicos debidos a cambio de materiales u operaciones .....	127
4.3.4. Consideraciones relacionadas al desempeño de las mezclas asfálticas modificadas.....	132
4.3.5. Alternativas para la cuantificación de los efectos generados por la mezcla asfáltica sobre el cambio climático.....	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	137
Conclusiones .....	137
Recomendaciones.....	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
APÉNDICES .....	153
A) Cuestionarios .....	153
A.1. Cuestionario sobre Datos Generales de la Planta Asfáltica .....	153
A.2. Cuestionario sobre Asfalto (importación y almacenamiento) .....	154
A.3. Cuestionario sobre Agregados Pétreos .....	155
A.4. Cuestionario sobre Material Reciclado .....	156
A.5. Cuestionario sobre Transporte y Almacenamiento de Asfalto en la Planta de Mezcla Asfáltica .....	159
A.6. Cuestionario sobre Planta de Mezcla Asfáltica .....	160
A.7. Cuestionario sobre Construcción de los Tramos de Carretera .....	162
B) Resultados intermedios .....	163

B.1. Información relativa a la comparación de varios ACV de mezclas asfálticas .....	163
C) Muestra de cálculo .....	165
C.1. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 1.....	165
C.2. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 2.....	167
C.3. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 3.....	170
C.4. Cálculo del factor de conversión de unidad funcional.....	171
C.5. Cálculo de la conversión de unidad funcional .....	172
C.6. Cálculo del consumo de combustible o de electricidad por kilogramo de material .....	174
D) Descripción general de la herramienta e instrucciones de uso .....	175
ANEXOS .....	199



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
<b>Figura 1.</b> Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura de producción (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018) .....	8
<b>Figura 2.</b> Clasificación de buques de acuerdo con su capacidad (Vallejo, 2016) .....	10
<b>Figura 3.</b> Esquema básico del proceso de producción de un quebrador (Araya, 2010) .....	13
<b>Figura 4.</b> Esquema del ciclo de vida de mezclas asfálticas (Espinoza & Campos, 2017) .....	36
<b>Figura 5.</b> Sección transversal del pavimento del tramo construido en el LanammeUCR ....	48
<b>Figura 6.</b> Esquema de los límites del sistema para el estudio .....	49
<b>Figura 7.</b> Porcentaje de distribución por barriles importados según el origen de los productos del petróleo basado en datos de RECOPE (2018b) .....	56
<b>Figura 8.</b> División geográfica de los cinco Distritos de Administración del Petróleo para la Defensa (Energy Information Administration, 2012) .....	57
<b>Figura 9.</b> Diagrama de las operaciones involucradas en la planta de mezcla asfáltica PRIME 140 (Ammann, 2014) .....	65
<b>Figura 10.</b> Estimación de la distancia y tiempo para el transporte marítimo del asfalto desde Estados Unidos hasta Costa Rica (Captura de pantalla de: Sea Distances and Ports Distances, 2019) .....	73
<b>Figura 11.</b> Captura de pantalla de la interfaz de la herramienta británica CCaLC versión 3 (Azapagic, et al., 2012).....	75
<b>Figura 12.</b> Sección de Inicio de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono de mezclas asfálticas (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	76
<b>Figura 13.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 1, parte A.....	79
<b>Figura 14.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 1, parte B.....	79
<b>Figura 15.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 2, parte A.....	80

<b>Figura 16.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 2, parte B .....	80
<b>Figura 17.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.1, parte A .....	81
<b>Figura 18.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.1, parte B .....	81
<b>Figura 19.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.2, parte A .....	82
<b>Figura 20.</b> Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.2, parte B .....	82
<b>Figura 21.</b> Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 1 .....	85
<b>Figura 22.</b> Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 2 .....	86
<b>Figura 23.</b> Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 3.1 .....	86
<b>Figura 24.</b> Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 3.2 .....	87
<b>Figura 25.</b> Comparación de la huella de carbono para 1 kg de agregados y 1 kg de PET reciclado .....	95
<b>Figura 26.</b> Comparación de la huella de carbono para 1 kg de Elvaloy y PPA con 1 kg de asfalto .....	96
<b>Figura 27.</b> Distribución porcentual de las unidades funcionales revisadas en el Cuadro XVII .....	103
<b>Figura 28.</b> Etapas estudiadas en el ciclo de vida de mezclas asfálticas reportadas en la literatura.....	105
<b>Figura 29.</b> Etapas analizadas más significativas en el ACV de mezclas asfálticas según varias investigaciones previas .....	106

<b>Figura 30.</b> Comparación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente para diferentes fuentes de generación de electricidad (Kommalapati, Kadiyala, Shahriar, & Huque, 2017; Instituto Meteorológico Nacional, 2019) .....	126
<b>Figura 31.</b> Sección relacionada a las Indicaciones de uso de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono de mezclas asfálticas (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	176
<b>Figura 32.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	182
<b>Figura 33.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	183
<b>Figura 34.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	183
<b>Figura 35.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	184
<b>Figura 36.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	185
<b>Figura 37.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	186
<b>Figura 38.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	186
<b>Figura 39.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	187
<b>Figura 40.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	188

<b>Figura 41.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de materia prima, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	188
<b>Figura 42.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de materia prima, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	189
<b>Figura 43.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	190
<b>Figura 44.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	190
<b>Figura 45.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	191
<b>Figura 46.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de la mezcla asfáltica (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .	192
<b>Figura 47.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la construcción de la vía (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	192
<b>Figura 48.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono total de la mezcla asfáltica, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	193
<b>Figura 49.</b> Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono total de la mezcla asfáltica, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	194
<b>Figura 50.</b> Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	195
<b>Figura 51.</b> Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada) .....	196

<b>Figura 52.</b> Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada).....	197
<b>Figura 53.</b> Etapa de pavimentación en la construcción de los tramos en el LanammeUCR .....	199
<b>Figura 54.</b> Etapa de compactación en la construcción de los tramos en el LanammeUCR (Foto tomada por Gabriela Cerdas el 20 de setiembre, 2019) .....	200

## ÍNDICE DE CUADROS

	Páginas
<b>Cuadro I.</b> Clasificación por tamaño de los agregados (Araya, 2010) .....	14
<b>Cuadro II.</b> Características de cada tramo construido en el LanammeUCR utilizando diferentes mezclas asfálticas.....	40
<b>Cuadro III.</b> Descripción de materiales utilizados en cada escenario analizado .....	40
<b>Cuadro IV.</b> Cantidad de productos derivados del petróleo exportado de Estados Unidos a Costa Rica según cada zona (Energy Information Administration, 2019).....	57
<b>Cuadro V.</b> Diseño de mezcla para producir 1 tonelada de mezcla asfáltica según cada escenario .....	70
<b>Cuadro VI.</b> Datos del inventario del ciclo de vida del caso de estudio relacionados a las actividades de procesamiento .....	71
<b>Cuadro VII.</b> Datos del inventario del ciclo de vida relacionados al transporte de materiales .....	72
<b>Cuadro VIII.</b> Huella de carbono para los diferentes escenarios analizados.....	84
<b>Cuadro IX.</b> Huella de carbono para cada etapa del ciclo de vida según cada escenario estudiado.....	88
<b>Cuadro X.</b> Emisiones de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de cada material pertenecientes a la etapa de transporte de materia prima .....	89
<b>Cuadro XI.</b> Emisiones de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de asfalto modificado en la etapa de producción de mezcla asfáltica .....	90
<b>Cuadro XII.</b> Distribución por material de la huella de carbono para la fase de producción de materia prima.....	91
<b>Cuadro XIII.</b> Comparación de la huella de carbono para los polímeros utilizados en los escenarios 2 y 3 .....	94
<b>Cuadro XIV.</b> Huella de carbono para el tramo construido en el LanammeUCR según los diferentes escenarios analizados .....	97
<b>Cuadro XV.</b> Huella de carbono para un tramo de 1 km de longitud y 2,05 m de ancho.....	98

<b>Cuadro XVI.</b> Comparación de casos con diferentes porcentajes de PET reciclado.....	99
<b>Cuadro XVII.</b> Resumen de unidades funcionales para diferentes casos de estudio .....	101
<b>Cuadro XVIII.</b> Categorización de las unidades funcionales revisadas en el Cuadro XVII y la cantidad de artículos que utilizan la unidad funcional respectiva .....	102
<b>Cuadro XIX.</b> Comparación de varios estudios sobre el ACV de pavimentos asfálticos a nivel global.....	109
<b>Cuadro XX.</b> Precio por litro dados por RECOPE para los diferentes tipos de combustibles (RECOPE, 2020) .....	131
<b>Cuadro XXI.</b> Características y resultados de investigaciones con unidades funcionales diferentes a “tonelada de mezcla asfáltica” .....	163
<b>Cuadro XXII.</b> Nivel de importancia por etapa del ciclo de vida para mezclas asfálticas en otras investigaciones .....	164

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

### Mayúsculas

<i>%PET</i>	Porcentaje de PET en la mezcla,%
<i>%POL</i>	Porcentaje de polímero,%
<i>%PTM</i>	Porcentaje total de asfalto sobre mezcla,%
<i>C</i>	Coeficiente, adim
<i>CMA</i>	Mezcla asfáltica fría
<i>CO<sub>2</sub>e</i>	Dióxido de carbono equivalente
<i>E</i>	Emisiones, kg <sub>GEI</sub>
<i>EVA</i>	Etilvinilacetato
<i>F</i>	Fuente de emisión, kWh o L o kg
<i>FC</i>	Factor de conversión, m <sup>3</sup> /ton <sub>mezcla</sub> o ¢/(kWh o L)
<i>FE</i>	Factor de emisión, kgCO <sub>2</sub> e/(kWh o L o kg)
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>GLP</i>	Gas licuado de petróleo
<i>HC</i>	Huella de carbono, kgCO <sub>2</sub> e/ton <sub>mezcla</sub>
<i>HMA</i>	Mezcla asfáltica caliente
<i>HWMA</i>	Mezcla asfáltica templada
<i>NFU</i>	Neumáticos fuera de uso
<i>P</i>	Propiedad del producto, kg o J o m <sup>3</sup> o \$
<i>RAP</i>	Pavimento asfáltico recuperado
<i>RAS</i>	Tejas asfálticas recuperadas
<i>RCA</i>	Agregado de cemento reciclado
<i>V</i>	Volumen, m <sup>3</sup>
<i>WMA</i>	Mezcla asfáltica tibia

### Minúsculas

<i>%m</i>	Porcentaje másico,%
-----------	---------------------



<i>a</i>	Ancho, m
<i>e</i>	Espesor, m
<i>l</i>	Largo, m
<i>m</i>	Masa, kg o ton
<i>n</i>	Cantidad de co-productos, adim.

### Superíndices

*	Agregado con PET
---	------------------

### Subíndices

1	Unidad funcional original
2	Unidad funcional tonelada de mezcla asfáltica
∅	Colones
<i>AG</i>	Agregado
<i>ASF</i>	Asfalto
<i>ASF MOD</i>	Asfalto modificado
<i>Elvaloy</i>	Elvaloy
<i>Finos</i>	Polvos finos
<i>Gruesos</i>	Agregados gruesos
<i>mezcla</i>	Mezcla asfáltica
<i>PET</i>	Tereftalato de polietileno
<i>POL</i>	Polímero
<i>PPA</i>	Ácido polifosfórico
<i>asigx</i>	Asignación del producto x
<i>x</i>	Producto x (cualquiera)
<i>xtotal</i>	Cantidad total del producto x

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, uno de los temas más preocupantes es el cambio climático generado por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI). Una gran responsabilidad sobre esta problemática se le atribuye al área industrial a nivel mundial, y al área de transporte en el país, donde específicamente se genera el aumento más significativo de los GEI. La vida en el planeta se puede ver afectada, desde aspectos ambientales, sociales hasta económicos, siendo de gran importancia su estudio y mitigación.

Sin embargo, muchas personas, organizaciones y gobiernos, han ido tomando conciencia sobre las consecuencias que se están enfrentando debido al cambio climático. Por esta razón, han optado por incorporar programas para estudiar y mitigar el cambio climático. Una parte de los efectos de este fenómeno global se pueden asociar a la producción de bienes, por lo que se han desarrollado métodos para disminuir las consecuencias producidas por este tipo de industria y mejorar los procesos en términos de la calidad de producción con énfasis en un desarrollo sostenible (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo ha propuesto los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), donde específicamente el objetivo 13 se relaciona con el cambio climático, siendo este el más relevante para el presente estudio (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018).

Por dicho motivo, una de las acciones para la mitigar los efectos del cambio climático es por medio de la disminución de GEI. Para llevarlo a cabo se debe realizar un estudio de las emisiones de GEI, determinando las fuentes de emisión, cuantificando las emisiones, analizando los datos y proporcionando soluciones. Este tipo de evaluaciones se puede

realizar por medio de muchas metodologías diferentes (Massolo, 2015). Dentro de esta investigación se utilizó el análisis de ciclo de vida (ACV).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un tipo de metodología empleada para evaluar los recursos utilizados y los impactos potenciales al ambiente generados por un bien o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Este tipo de metodología se detalla y regula dentro de la norma ISO 14040, permite obtener un perfil ambiental de un producto o servicio, o puede comparar varios de ellos (Álvarez, 2014). De acuerdo con el procedimiento indicado en la norma ISO 14040:2006, esta herramienta cuenta con cuatro fases principales: definición del objetivo y alcance, inventario del ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida y la interpretación del ciclo de vida. De esta manera, es posible presentar una base para la toma de acciones necesarias que mejoren el rendimiento del sistema y la reducción de las emisiones de GEI, en aras de un desarrollo sostenible (International Standard Organization, 2006).

Dicha metodología se utiliza con cualquier tipo de producto, por lo que en esta investigación se aplica al asfalto convencional y asfalto modificado con polímeros. En general, al asfalto modificado se le incorporan polímeros para variar sus características físicas y reológicas, además de intentar mejorar el desempeño del mismo. La producción de asfaltos modificados y sin modificar genera una gran cantidad de contaminantes, razón por la cual se están realizando esfuerzos para encontrar alternativas que mitiguen sus efectos. Actualmente, se está trabajando en iniciativas que plantean utilizar un porcentaje importante de plástico de desecho para modificar asfaltos; tal es el caso del programa de Pavimentos Verdes desarrollado por el LanammeUCR (LanammeUCR, 2018).

El presente estudio desea evaluar la huella de carbono del asfalto verde, asfalto modificado y asfalto convencional utilizando el método de análisis de ciclo de vida basado en la norma ISO 14040:2006. De esta forma, se espera verificar si existe una diferencia en las emisiones

de cada asfalto estudiado y realizar recomendaciones para poder disminuir los impactos generados durante el ciclo de vida respectivo, con la finalidad de recomendar la mejor opción de asfalto en términos menores emisiones de GEI. El proyecto también contribuye por medio del ámbito académico al ambiente político del país. Actualmente se está introduciendo el Plan Nacional de Descarbonización, Compromiso País 2018-2050, donde Costa Rica aspira a ser una economía verde promoviendo el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019). Por medio de esta investigación, se genera información y nuevas opciones en el área de infraestructura vial para incentivar un desarrollo sostenible.

De esta manera, se espera colaborar en el conocimiento para futuras organizaciones y gobiernos que deseen utilizar este tipo materiales o proyectos beneficiosos para el medio ambiente.

## **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – CASO ANÁLISIS DE VARIOS TIPOS DE ASFALTOS**

En el presente capítulo se describen los fundamentos teóricos relacionados al Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación a los casos de estudio que involucra el asfalto convencional, el asfalto verde y el asfalto modificado. Se engloban temas como efecto invernadero, cambio climático, Análisis de Ciclo de Vida, normas ISO 14040, huella de carbono, mezclas asfálticas, pavimentos verdes, entre otros.

### **1.1. Cambio climático**

Uno de los temas más discutidos en la actualidad es el cambio climático. El cambio climático se refiere a la modificación en el clima debido directa o indirectamente a la actividad humana, la cual perturba la composición de la atmósfera mundial, donde también se agrega la variabilidad natural del clima que ha sido monitoreado en periodos comparables (Díaz, 2012). Dentro de las principales consecuencias de este fenómeno se encuentra el aumento de la temperatura media del planeta, el incremento en la frecuencia e intensidad de sequías, precipitaciones y eventos climáticos extremos, como huracanes (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

Los problemas generados son tan amplios que pueden afectar dentro del ámbito ambiental, económico y social. Debido a esto, muchas organizaciones y gobiernos se han preocupado por estudiar este fenómeno, siendo el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) uno de ellos. Este grupo se creó con el propósito de proporcionar información científica objetiva, publicando informes periódicos sobre los cambios en el planeta, estimaciones futuras y recomendaciones para el bien común (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

La gran preocupación sobre los impactos del cambio climático ha conducido a una mayor conciencia con respecto a su mitigación, por lo que para afrontarlo se ha incluido dentro de

los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Específicamente, el objetivo 13 relacionado a la acción por el clima. Dicho objetivo establece como meta el fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relativos a desastres naturales o clima, agregar medidas relacionadas al cambio climático dentro de políticas de cada país e internacionales, mejorar la educación sobre la mitigación del cambio climático, entre otros (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018).

### **1.2. Efecto invernadero y gases de efecto invernadero (GEI)**

A pesar de las acciones realizadas contra el cambio climático, la acumulación de los gases de efecto invernadero (GEI) continúa en aumento, principalmente por el modelo de desarrollo actual a través del uso desproporcionado de combustibles fósiles, fertilizantes y otras fuentes. De esta manera, dentro de las mayores implicaciones se destaca un efecto invernadero desmesurado, provocando un aumento en la temperatura de la superficie terrestre mayor a lo debido por el incremento de GEI (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

El efecto invernadero se refiere a un fenómeno natural en donde la radiación de la superficie del planeta es absorbida por de los gases que no escapan de la atmósfera (específicamente GEI), y la irradia en todas direcciones. La radiación que es devuelta a la superficie genera un aumento en la temperatura media superficial y se mantiene relativamente estable, la cual corresponde a un promedio global de 15 °C (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

Dentro de los grandes esfuerzos para combatir los impactos del cambio climático, se encuentra la firma de acuerdos internacionales, donde se promueve la aplicación de inventarios GEI. Los inventarios de GEI corresponden a una herramienta que permite recopilar las emisiones o remociones de estos gases en una zona definida durante un periodo de tiempo (Álvarez, 2014).

Los GEI que se deben cuantificar para un inventario de emisiones son: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) y trifloruro de nitrógeno ( $\text{NF}_3$ ) (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

La importancia de estos inventarios radica principalmente en proporcionar información científica, para utilizarla en la formulación e implementación de políticas relacionadas al cambio climático. Asimismo, impulsa el objetivo 13 del desarrollo sostenible mencionado anteriormente. Otro de sus aportes es en la identificación de sectores, fuentes y actividades responsables por las emisiones de GEI. Es útil también para desarrollar el costo y la efectividad de políticas de mitigación y, por último, monitorea el progreso hacia los objetivos planteados (Krug, 2015; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018).

### **1.3. Mezclas asfálticas**

En Costa Rica, cerca del 90% de la Red Vial Nacional Pavimentada está construida con asfalto. Además, debido al aumento de la flota vehicular y programas de recarpeteo de carreteras, las mezclas asfálticas son altamente utilizadas en el país, razón importante para su estudio y mejoramiento (Miranda, 2019).

Las mezclas asfálticas corresponden al conjunto de agregados pétreos y un ligante asfáltico, aunque actualmente se han estudiado distintas variaciones por lo que pueden incluir agentes modificantes como polímeros o residuos. Dentro de las principales propiedades que deberían presentar es la resistencia a la fatiga, a las deformaciones permanentes, al deslizamiento, al envejecimiento, a las condiciones ambientales, también poseer alta durabilidad, estabilidad, entre otros (Reyes & Rondón, 2015).

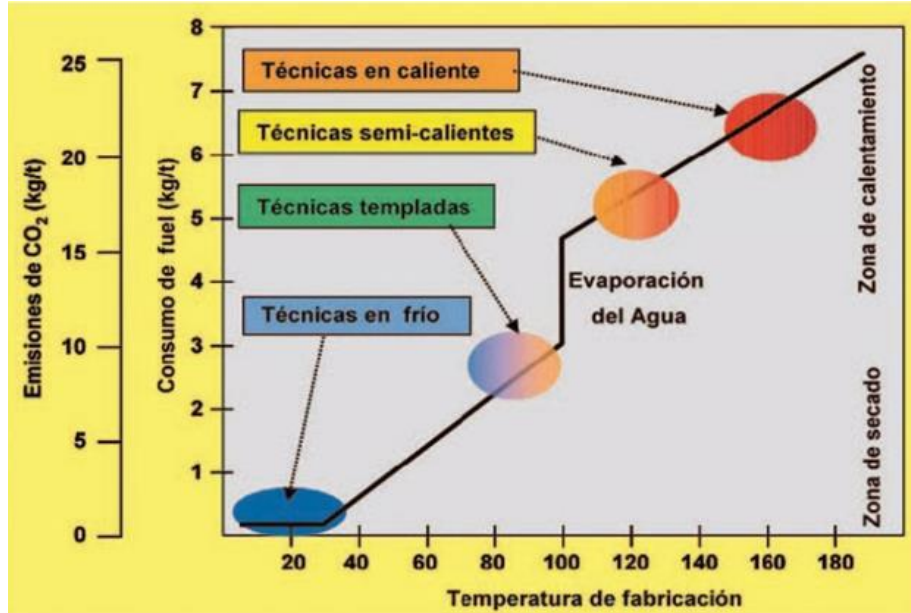
### **1.3.1. Clasificación de mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar según la temperatura de producción como se muestra seguidamente, y es importante recalcar que la mezcla asfáltica caliente es el tipo más utilizado a nivel mundial (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018):

- Mezcla asfáltica caliente (HMA, por sus siglas en inglés) con temperaturas de producción entre 150 °C y 190 °C.
- Mezcla asfáltica semi-caliente o tibia (WMA, por sus siglas en inglés) presenta temperaturas de fabricación entre 100 °C y 140 °C.
- Mezcla asfáltica templada (HWMA, por sus siglas en inglés) muestra rangos de temperaturas de producción de 60 °C a 100 °C.
- Mezcla asfáltica fría (CMA, por sus siglas en inglés) con un intervalo de temperaturas de producción englobadas desde 0 °C hasta 40 °C.

La temperatura seleccionada en la etapa de producción afecta el consumo de combustible y, por ende, las emisiones. Como se muestra en la Figura 1, entre mayor sea la temperatura de fabricación, mayor es la cantidad de consumo de combustible y las emisiones liberadas al ambiente. Asimismo, es importante considerar que esa energía producida por medio del combustible se aprovecha cerca del 50% para el calentamiento y mezcla de los materiales. Entre el 30% y 35% de esa energía generada se disipa en pérdidas, y un 15% se consume debido a la evaporación del agua (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).





**Figura 1.** Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura de producción (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018)

Las mezclas asfálticas calientes son las más utilizadas a nivel global y se encuentran constituidas por ligante asfáltico, agregados pétreos y, opcionalmente, modificadores para mejorar sus propiedades. Su proceso de fabricación se basa en calentar la materia prima a temperaturas entre 150 °C y 190 °C durante un tiempo determinado por el diseño de mezcla y sus constituyentes. Las ventajas de su uso radican en el buen manejo de cargas pesadas, una vida útil larga con el debido mantenimiento y pueden reciclarse para ser reutilizadas en otros proyectos posteriores (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).

Por otra parte, las mezclas asfálticas tibias permiten disminuir la temperatura de mezclado de la misma, en comparación con una mezcla caliente. Para este tipo de mezclas, es usual añadir aditivos que reducen la viscosidad del bitumen o la tensión superficial entre el agregado y el ligante. Dentro de los más comunes se encuentran las ceras del tipo Fischer-Tropsch, las sintéticas y las de polietileno. Existen otros métodos innovadores donde se agregan residuos industriales, por ejemplo, aceite crudo de palma (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).

Otros tipos de aditivos son los tenso-activos, encargados de reducir la tensión superficial entre el agregado y el ligante sin modificar la viscosidad del material bituminoso, dichos materiales no modifican las propiedades reológicas del ligante. Este aditivo mejora las propiedades de adherencia y cohesión entre los materiales involucrados (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).

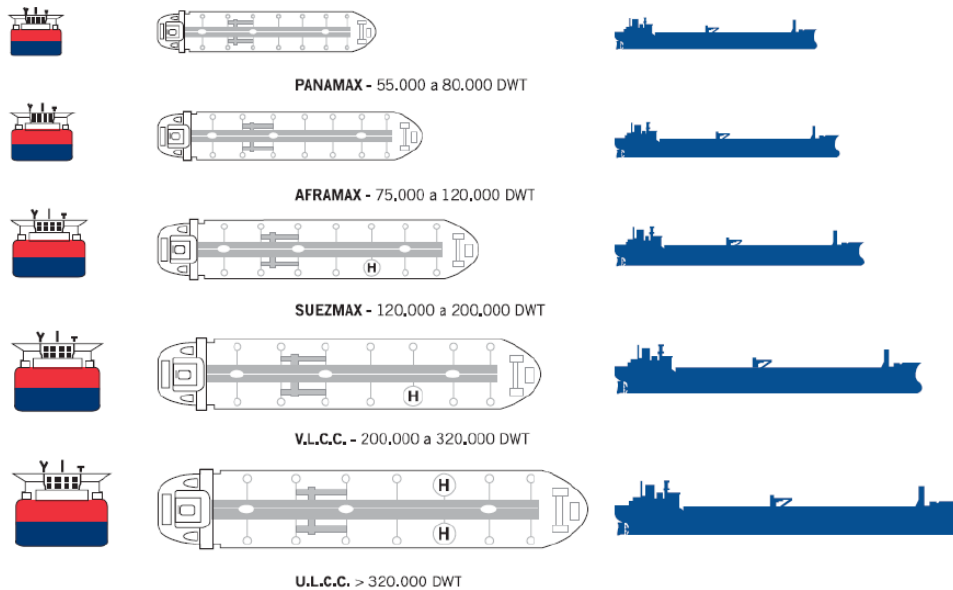
### **1.3.2. Asfalto y modificaciones**

Como se ha detallado anteriormente, uno de los principales materiales en las mezclas asfálticas es el asfalto, el cual corresponde a la fracción más pesada obtenida por medio de la destilación del petróleo o encontrada en yacimientos de asfalto, también conocido como ligante asfáltico o betún. Este es un material viscoelástico y compuesto principalmente por cadenas largas de hidrocarburos de alto peso molecular (Villegas, Aguiar, & Loria, 2015).

En Costa Rica este material es importado por parte de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). Según acuerdos existentes entre las empresas constructoras, CONAVI, MOPT y RECOPE, el asfalto vendido es el AC-30 (Benavides, 2017; RECOPE, 2018a).

Los productos derivados del petróleo ingresan a Costa Rica por el puerto de Moín, Limón. El transporte de estos productos se realiza por medio de buques petroleros, los cuales se pueden dividir en pesados o sucios, y en ligeros o limpios. Los buques petroleros sucios transportan petróleo crudo, asfalto o fuel-oil, mientras que los limpios trasladan productos refinado como gasolina, gasoil o jet fuel (Vallejo, 2016).

Comúnmente se clasifica el tipo de buque según su capacidad medido en tonelaje de peso muerto (TPM o DWT por sus siglas en inglés), según se muestra en la Figura 2 (Vallejo, 2016).



**Figura 2.** Clasificación de buques de acuerdo con su capacidad (Vallejo, 2016)

El tipo de embarcación más común en los puertos del Caribe y América Latina es el Panamax, con un tonelaje entre los 55 000 TPM y los 80 000 TPM. Este tipo de buques deben su nombre a que cumple con las especificaciones para transitar por el Canal de Panamá. Pueden transportar desde petróleo crudo hasta productos refinados livianos. Debido al tipo de bienes que manejan necesitan de un sistema de calefacción para mantener el producto a la temperatura requerida y para que conserve sus propiedades (Vallejo, 2016).

Aparte de los cuidados en el transporte del material, es común que al asfalto se le incorporen distintos polímeros para variar sus características físicas y reológicas, principalmente con el objetivo de mejorar el desempeño del material (LanammeUCR, 2018).

La modificación de mezclas asfálticas con polímeros puede llevarse a cabo por medio de dos métodos, ya sea seco o húmedo. La diferencia se debe a que en un proceso húmedo se reemplaza un porcentaje del asfalto por un polímero, donde el modificante se agrega al

asfalto en caliente. Por otro lado, para el proceso seco, el agente modificante se adiciona a la mezcla junto con los agregados (Ramírez, Ladino, & Rosas, 2014).

En la modificación por vía seca se sustituye una cantidad de agregados por cierto porcentaje de polímero. Por esta razón suele disminuir la cantidad de agregados requeridos, aunque dependiendo del diseño de mezcla podría llegar a utilizar mayores cantidades de ligante. El polímero y los agregados previamente calentados se mezclan junto con el ligante, respetando los tiempos de incorporación y las temperaturas determinadas para la producción (Ramírez, Ladino, & Rosas, 2014; Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).

Los métodos por vía húmeda se caracterizan por requerir equipos adicionales en la planta de producción, relacionados con el proceso añadido de mezclado previo entre el polímero y el ligante. Los principales equipos y accesorios requeridos para esta actividad son el tanque de almacenamiento de polímeros, el equipo con calentamiento para mezclado de polímero y asfalto, bombas y tuberías. La temperatura a la que se mezcla depende del tipo de asfalto y polímero modificador. Debido a la cantidad de equipos adicionales y el aumento de temperatura en la mezcla del asfalto modificado, es de esperar que aumente el consumo energético en la producción comparado con el método seco (Ramírez, Ladino, & Rosas, 2014).

La modificación de asfalto se puede llevar a cabo con una gran variedad de polímeros, los cuales aportan una gran cantidad de contaminantes al ambiente debido a su producción (LanammeUCR, 2018). Dentro de las modificaciones más comunes se encuentran las siguientes:

**a) Modificación con estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés)**

El SBS es un polímero termoplástico, se caracteriza por ser sólido a temperatura ambiente con propiedades viscoelásticas. El estireno le otorga rigidez al material y el butadieno

proporciona elasticidad, disipando mejor la energía al trabajar en conjunto. Se ha demostrado que al modificar un asfalto AC-30 con SBS se logra reducir la deformación plástica hasta en un 70% (Villegas, Aguiar, Loria, & Navas, 2014).

**b) Modificación con estireno-butadieno-caucho (SBR, por sus siglas en inglés)**

El SBR mejora la ductilidad del material a bajas temperaturas, la recuperación elástica, las propiedades adhesivas y cohesivas y, aumenta la viscosidad del material. El hecho de que aumente la ductilidad permite al asfalto ser más flexible y resistir agrietamientos a bajas temperaturas. Sin embargo, con el calentamiento de la planta y la colocación en la carretera, el material tiende a disminuir la ductilidad debido a que el butadieno permite que la oxidación ocurra más fácilmente (Zhang & Yu, 2010).

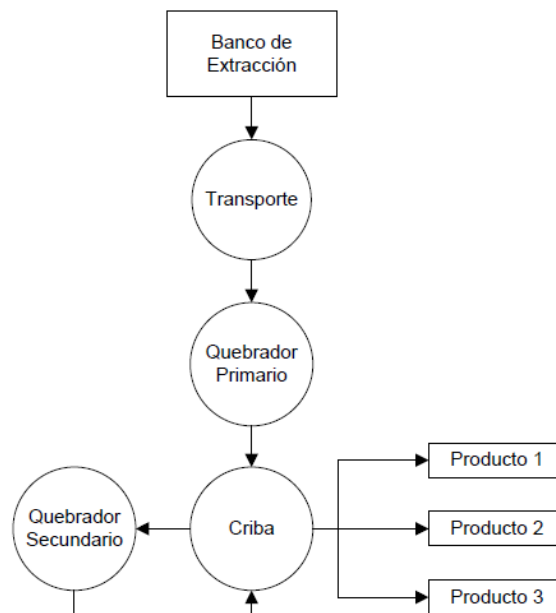
**c) Modificación con Terpolímero Elastomérico Reactivo (RET) con Ácido Polifosfórico (PPA)**

El polímero RET, conocido también como Elvaloy, ha sido identificado como Etilvinilacetato (EVA). Por medio de varios estudios se ha determinado que al mezclarse con PPA mejora el desempeño del ligante asfáltico modificado. La adición de PPA mejora la rigidez de la carpeta asfáltica, ya que dicho polímero rompe las aglomeraciones de los asfaltenos. Asimismo, el PPA facilita la eficiencia en la dispersión del polímero en el asfalto, también mejora el mezclado y la compactación de la mezcla asfáltica y, disminuye los costos como consecuencia de la reducción en la cantidad de polímero adicionado (Singh, Kumar, Kataware, & Habal, 2017).

### **1.3.3. Agregados**

Los agregados proporcionan resistencia a la mezcla asfáltica al ser el material en mayor proporción. Dichos materiales constituyen entre el 90% y 95% en peso de la mezcla asfáltica, por lo que su correcta selección y producción son de suma importancia. En general, este material se produce en quebradores donde se extrae el material de la fuente,

ya sea un río o cantera, y se transporta a un quebrador primario para tritararlo inicialmente. Este producto continúa a una criba en la cual se separan los materiales de varios tamaños. El material retenido en el primer tamiz prosigue a un segundo triturador para reducir su tamaño y reingresa a la criba (Araya, 2010). Un esquema del proceso se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Esquema básico del proceso de producción de un quebrador (Araya, 2010)

Se dividen principalmente en dos grandes categorías, los agregados gruesos y los agregados finos, aunque también se pueden considerar los agregados intermedios en muchas ocasiones. Los tipos más comunes de agregados gruesos y el rango de sus dimensiones se ejemplifican en el Cuadro I. Dentro de los agregados finos se encuentra la arena y el polvo de piedra (también conocido como arena procesada o industrial). La arena se obtiene del banco de extracción y se tamiza para su recuperación, mientras que el polvo de piedra se recolecta durante las diferentes etapas de triturado del agregado y se separa hasta el final del proceso (Araya, 2010).

**Cuadro I.** Clasificación por tamaño de los agregados (Araya, 2010)

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Dimensiones /(mm)</b>
Piedra primera	50 – 76
Piedra segunda	38 – 50
Piedra tercera	25 – 38
Piedra tercerilla	19 – 25
Piedra cuarta (cuartilla)	12 – 19
Piedra quinta (quintilla)	9,5 – 19

#### **1.4. Pavimentos verdes**

Los pavimentos verdes son una opción para dar un uso a residuos, normalmente de plástico, generando una disminución en el volumen de desechos y reducción de emisiones de GEI. Están siendo utilizados alrededor del mundo y conforme aumentan las investigaciones en el tema, la innovación y su aplicación continúa en crecimiento. Algunos de los materiales considerados como desecho se pueden agregar a las mezclas asfálticas. Tal caso se presenta para materiales de residuo como bolsas desechables, caucho de neumáticos reciclados, cenizas resultantes de la producción de hormigón, plástico reciclado de botellas de polietileno tereftalato (PET), vidrio reciclado, blíster de medicamentos (envase con cavidades en forma de ampolla, generalmente de cloruro de polivinilo), entre otros (Angelone, Cauhapé, Borghi, & Martínez, 2016; Cajina, 2020).

Este tipo de técnicas se ha estado estudiando en el país, específicamente por medio del proyecto de Pavimentos Verdes del LanammeUCR. Se han desarrollado pavimentos con emulsiones asfálticas, asfaltos espumados, modificación con polímeros reciclados y reciclaje del mismo. Específicamente, para producir el asfalto verde se modifican varias mezclas convencionales con materiales como plástico de botellas de PET recicladas, polietileno (PE) reciclado y arenas sintéticas, con el objetivo de mejorar la vida útil del asfalto y reutilizar material de desecho. Se puede utilizar una amplia gama de polímeros con el mismo propósito, pero es necesario tomar en cuenta que el plástico se pueda obtener de una manera sencilla, se debe buscar que mejore el desempeño del asfalto, y que se pueda

incorporar de manera industrial tomando en cuenta las temperaturas de producción (Brunner, 2018; LanammeUCR, 2018).

#### **1.4.1. Residuos de polímeros**

Se ha innovado en la producción de pavimentos verdes por medio de la adición de residuos plásticos con el objetivo reducir la contaminación y, a la misma vez, mejorar las propiedades del producto final (Cajina, 2020). Algunos de los plásticos más utilizados se describen a continuación.

- Polietileno (PE)

La modificación de asfalto con polietileno provoca que el material presente una alta expansión térmica al producto, reduce la deformación y la fatiga, pero causa una baja rigidez. Una de sus ventajas es que se puede incorporar en mezclas asfálticas tibias (Fjóra, 2018).

El polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) es utilizado mayormente como sustituyente de un porcentaje de agregados, ayuda en el incremento de la estabilidad de la mezcla, disminuye la densidad, presenta una baja absorción de humedad y proporciona características que vuelven la mezcla más resistente al impacto. Es posible obtener este material de bolsas plásticas recicladas (Fjóra, 2018).

El polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés) ofrece una buena resistencia a la abrasión y baja permeabilidad a la humedad, pero disminuye la rigidez y soporte estructural de la mezcla, por lo que no es tan utilizado (Fjóra, 2018).

- Polipropileno (PP)

El polipropileno se puede encontrar en parachoques de automóviles, como fibras o láminas, en filamentos para impresoras 3D, entre otros. Este polímero es reconocido por proveer



buena resistencia a la fatiga. Sin embargo, al modificar el asfalto con este plástico, se vuelve más susceptible a la oxidación y a la expansión térmica. Asimismo, se pueden incorporar en mezclas asfálticas tibias como agente modificante (Fjóra, 2018).

- Poliestireno (PS)

El reciclaje del poliestireno es muy difícil, razón por la cual es de los polímeros con la menor cantidad de estudios relacionados a la implementación como aditivo en la construcción de carreteras. No obstante, se ha estudiado su implementación en asfaltos modificados, en los cuales se ha observado un incremento en la viscosidad, una disminución en la rigidez, y un aumento en la temperatura de ablandamiento (Fjóra, 2018; Nassar, Kabel, & Ibrahim, 2012).

- Cloruro de polivinilo (PVC)

El cloruro de polivinilo se clasifica como un material termoplástico formado a partir de la electrólisis del agua salada para generar el cloro, junto con el etileno derivado de la refinación del petróleo. Estos reactivos generan el monómero cloruro de vinilo, que al polimerizarse se obtiene el PVC (Corella, 2019). Es posible agregarlo en mezclas asfálticas como modificante para su reutilización. Dentro de los posibles materiales que se estudian para incorporar en mezclas asfálticas se encuentra la incorporación de blíster de medicamentos de PVC (Cajina, 2020). Sin embargo, el PVC puede liberar cloruros de hidrógeno o dioxinas en la etapa de modificación del asfalto por la exposición a elevadas temperaturas, por lo que estas condiciones deben ser muy controladas al momento a agregarlo en mezclas asfálticas (Fjóra, 2018).

- Caucho

El caucho se puede obtener de forma natural por medio del látex o sintética. Son polímeros elastómeros con resistencia al desgaste. El grano de caucho reciclado se obtiene a partir de neumáticos fuera de uso (NFU) (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). Al utilizarlo como modificante de mezclas asfálticas, estas presentan mejor resistencia al agrietamiento, a la

oxidación y al envejecimiento, disminuyendo costos en la etapa de mantenimiento del pavimento (Calahorra, Giménez, Herrera, Martínez, & Salazar, 2016).

- Tereftalato de polietileno (PET)

El PET es muy utilizado en la manufactura de material de empaque como botellas o contenedores de comida (Sreeram, Leng, Padhan, & Qu, 2018). Dentro de las ventajas conocidas por agregar PET a las mezclas asfálticas, se encuentra la mejora de la estabilidad del producto y la vida de fatiga, pero pueden afectar la separación de fases y disminuir la gravedad específica. La cantidad de PET agregada varían según cada investigación y los valores rondan desde el 1% hasta el 30% (Sreeram, Leng, Padhan, & Qu, 2018; Jegatheesan, Rengarasu, & Wasala, 2018).

Es posible reciclar este polímero por medio de métodos físicos o químicos. El reciclaje por métodos físicos o mecánicos incluye la reducción del tamaño entre los 2 mm a 10 mm y son comúnmente agregados en mezclas asfálticas por medio de una vía seca a temperaturas cercanas a los 170 °C (Ahmad, et al., 2017). El reciclaje por métodos químicos implica una reacción adicional, donde se forman aditivos a partir del PET. Estos nuevos aditivos se pueden incorporar en mezclas asfálticas por un método húmedo a temperaturas entre los 170 °C y 180 °C (Sreeram, Leng, Padhan, & Qu, 2018).

#### **1.4.2. Materiales reciclados para incorporar en mezclas asfálticas**

Aparte de los residuos de polímeros, es posible incorporar materiales residuales dentro de las mezclas asfálticas. La mayoría de estos materiales requiere de tratamiento previo a su utilización. La finalidad de aprovechar este tipo de materiales es el disminuir el consumo de materia prima como asfalto o agregados, y el impacto que genera su producción (Pouranian & Shishehbor, 2019). A continuación se detallan algunos de los materiales reciclados más utilizados dentro de las mezclas asfálticas.

- Tejas asfálticas recuperadas (RAS, por sus siglas en inglés)

El RAS es mayormente usado en Estados Unidos como material reciclado en mezclas asfálticas calientes o tibias, donde se separa el asfalto por medio de procesos térmicos. Dentro de sus principales limitaciones destaca una mayor rigidez del asfalto extraído, ya que este se ha envejecido y oxidado debido al paso del tiempo, exposición al ambiente, entre otros. Además, puede contaminarse durante el proceso de recuperación del material (Pouranian & Shishehbor, 2019).

- Agregado de cemento reciclado (RCA, por sus siglas en inglés)

El pavimento de cemento reciclado es obtenido al demoler estructuras de concreto y, al igual que el RAS, se puede agregar a mezclas asfálticas calientes o tibias. Se puede señalar como desventaja la vulnerabilidad al daño por humedad, por lo que a veces no es recomendado utilizarlo (Martinho, Picado, & Capitão, 2018).

- Desechos de construcción y demolición (C y D)

Los desechos de construcción y demolición se refieren a los residuos de materiales producidos por actividades como la construcción o remodelación de edificios o casas. El aumento de C y D ha incrementado en los últimos años, por lo que reutilizarlos ayuda al ambiente y a la mezcla. Cuando estos materiales sustituyen parte de los agregados, la mezcla presenta mejor resistencia a la deformación permanente, aunque su resistencia a la humedad y la fatiga disminuyen. Otra desventaja es que requieren una mayor cantidad de bitumen comparado con una mezcla que contenga agregados naturales (Pouranian & Shishehbor, 2019).

- Desechos de cobre y acero

Los desechos de acero se generan mayormente en la producción de acero inoxidable. Presenta la misma desventaja que los C y D, debido a que requiere más cantidad de asfalto que una mezcla con agregados naturales. Por otra parte, la estabilidad de la mezcla se ve

mejorada al igual que la resistencia a la fatiga. Los desechos de cobre son un subproducto de la fabricación del mismo. Cuando se sustituye por agregados, estos ayudan a mejorar la susceptibilidad a la humedad, aunque no es muy común su utilización en Estados Unidos ni en Europa (Pouranian & Shishehbor, 2019).

- Pavimento de asfalto recuperado (RAP, por sus siglas en inglés)

Al reciclaje de pavimentos se le conoce como pavimento de asfalto recuperado (RAP) y es una técnica aplicada alrededor del mundo. El tratamiento de estos desechos es difícil, por lo que su reutilización genera una disminución en los residuos generados (Pouranian & Shishehbor, 2019).

Este material se produce a partir del proceso de fresado, el cual es una técnica de rehabilitación de pavimentos en donde se remueven las partes defectuosas sin afectar las que se encuentren en buen estado. Los materiales resultantes se habrían desechado, pero esta técnica promueve su reutilización (Sampedro, Del Val, Gallego, Querol, & Del Pozo, 2012).

Según Sampedro et al. (2012), se ha determinado que la incorporación de RAP en porcentajes menores al 30%, presenta beneficios en cuanto a la disminución de la huella de carbono global. Sin embargo, las emisiones aumentan al superar este porcentaje. La razón de esta desventaja se debe a la temperatura de producción de este tipo de mezclas, la cual puede mantenerse igual si los porcentajes añadidos son bajos, pero para contenidos más altos, la temperatura podría aumentar entre 5 °C y 8 °C, consumiendo así más combustible o electricidad (Leiva & Vargas, 2014).

De acuerdo con Van de Ven et al. (2012), para una mezcla con un 25% de RAP el consumo energético aumenta un 2,5% con respecto a la que tiene un 0% de RAP, y cuando la composición presenta un 50% de RAP, el aumento del consumo energético corresponde a

un 5%. Sin embargo, aunque aumenta el consumo de combustible, estas emisiones generadas se compensan con las no emitidas por los agregados que se sustituyen con el RAP (Van de Ven, Jenkins, & Van den Beemt, 2012).

Sin embargo, como el RAP contiene asfalto envejecido por los años de servicio en la carretera inicial, podría provocar fallos en la nueva carretera, como daños por humedad o fatiga. Con el objetivo de mitigar esta rigidez extra en la nueva mezcla asfáltica, se ha investigado la adición de polímeros como SBS, EVA, PE y PET, los cuales mejoran el desempeño de la mezcla asfáltica (Leng, Al-Qadi, & Cao, 2017).

### **1.5. Huella de carbono como indicador**

A partir del instante en que se acuerda realizar cambios en el tipo de desarrollo de un bien o servicio, nace la necesidad de poseer herramientas que ayuden a decidir si esos cambios están generando el efecto esperado y en qué medida alcanzan los objetivos planteados. Uno de los indicadores ambientales más utilizados se basa en el concepto de “huella”. La huella energética, la huella hídrica, la huella de exergía, la huella de carbono, la huella de la biodiversidad, la huella química, la huella de agua y la huella ambiental, son solamente algunos ejemplos (Álvarez, 2014).

La huella de carbono se define como la cantidad de GEI asociados a la producción o consumo de bienes o servicios (Schneider & Samaniego, 2010). Usualmente, este indicador se reporta en términos de toneladas o kilogramos de dióxido de carbono equivalente, y se define dentro de un período temporal específico. Esta unidad se utiliza para normalizar y comparar las emisiones generadas por diferentes GEI (Corporación Interamericana de Inversiones, 2018).

La huella de carbono se considera como uno de los indicadores más importantes, ya que su cuantificación se puede realizar de una manera rápida y más sencilla comparado con otros

indicadores. Además, al ser estudiada extensamente, existen muchas bases de datos con la huella de carbono para una amplia gama de bienes y servicios (Schneider & Samaniego, 2010).

La huella de carbono se puede aplicar principalmente a cuatro ámbitos descritos a continuación:

- a)** Huella de carbono de una organización: Brinda información sobre la cantidad de GEI emitidos debido a cierta entidad. Su cuantificación se basa en el estándar internacional conocido como Protocolo GEI, junto con varias normas aplicables como la ISO 14064 y la ISO 14069 (Álvarez, 2014). Asimismo, se encuentra la Guía para el cálculo de la Huella de Carbono de la Oficina Española de Cambio Climático y la Guía de cómo medir y reportar las emisiones de GEI DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs, por sus siglas en inglés) (García, 2013).
- b)** Huella de carbono de eventos: Muestra las emisiones de GEI durante la planificación y desarrollo de un evento de una organización específica (García, 2013).
- c)** Huella de carbono de un producto (o servicio): Aporta información sobre la cantidad de GEI emitidos durante el ciclo de vida de un producto y se expresa en toneladas (o kilogramos) de dióxido de carbono equivalente por unidad funcional del producto analizado. Se pueden aplicar ciertos métodos de evaluación como Análisis de Ciclo de Vida (ACV) basado en la norma ISO 14040 y, específicamente, la norma ISO 14067, también se utilizan otros lineamientos como PAS (Publicly Available Specification, por sus siglas en inglés) 2050, Límites Planetarios, Evaluaciones de Impacto Ambiental, Objetivos de Desarrollo Sostenible impulsada por las Naciones Unidas, entre otros (Dong & Hauschild, 2017).
- d)** Huella de carbono de personas: Indica las emisiones de GEI generadas por la vida cotidiana de una persona, abarcando todas sus actividades (García, 2013).

En general, la ecuación 1 describe la manera para calcular las emisiones que van a conformar la huella de carbono. El término fuente de emisión se refiere a la cantidad de combustible consumido para realizar una actividad dentro de un proceso, la cantidad de masa requerida de cierto material, el consumo de electricidad requerido en una operación unitaria, entre otros. Estos valores se obtienen del inventario para el producto o la organización, y se pueden expresar en términos de kilogramos cuando se trata de cantidad de masa, litros para combustible consumido o kilowatts hora en el caso de consumo eléctrico, dividido entre la masa en kilogramos del producto en estudio. El potencial de calentamiento global se utiliza para convertir emisiones de GEI en términos de dióxido de carbono equivalente (Bo, Xueyong, Xunjie, & Wenying, 2017).

$$E_x = F_x \cdot FE \cdot PGG_i \cdot m_x \quad (1)$$

Donde,

$E_x$ : Emisiones de dióxido de carbono equivalente del producto x, kgCO<sub>2</sub>e

$F_x$ : Fuente de emisión del producto x, unidad según fuente de emisión/kg<sub>x</sub>

$FE$ : Factor de emisión, (kgCO<sub>2</sub>/unidad según fuente de emisión)

$PGG_i$ : Potencial de calentamiento global para la sustancia i, (kg<sub>i</sub>/kgCO<sub>2</sub>e)

$m_x$ : Masa total del producto x, kg<sub>total</sub>

Para la obtención de la huella de carbono de un producto, se suman todos los resultados obtenidos en cada fase de su ciclo de vida. La ecuación 1 muestra la manera general para la cuantificación de la huella de carbono, pero existen muchas modificaciones y hasta regresiones para evaluar el comportamiento de diferentes materiales (Bo, Xueyong, Xunjie, & Wenying, 2017).

### **1.6. Herramientas de cuantificación de huella de carbono**

Según lo mencionado anteriormente, la huella de carbono es uno de los indicadores de cambio climático más utilizados a nivel global, razón por la cual existen muchas bases de datos con valores relacionados a este tema. Sin embargo, mucha de esta información es general y no se centra en las especificaciones de un producto u organización, así que se han desarrollado y se continúa trabajando en herramientas que realicen estos cálculos. Cuando se desea centrar en un bien, la herramienta se crea con este producto como objetivo, por lo que puede ser mucho más específica (Chen, Su, & Huang, 2013).

Al desarrollar este tipo de herramientas, se recomienda establecer una base de datos propia, tomando información de alrededor de unas 5 fuentes externas y confiables. Dentro de las ventajas que se obtienen es una interfaz más amigable con el usuario y permite especificar valores relacionados a la zona geográfica donde se desee utilizar. Con el objetivo de facilitar la utilización de la misma, una buena práctica es agregar instrucciones de uso y desplegar la información de lo más general a lo más específico, para así evitar confusiones (Isasa, et al., 2014).

Algunos de los problemas más comunes que surgen al realizar estos proyectos es la utilización de datos de mala calidad, la presencia de secciones u opciones similares que confundan al usuario, la discrepancia de unidades entre los resultados y la información de la base de datos, la ausencia de información requerida por el usuario. De esta forma, una buena práctica es verificar el origen de la información para las bases de datos y comparar los resultados para un mismo producto de varias fuentes. Asimismo, se deben unificar las unidades, en el caso de la huella de carbono lo más común es presentar los datos en términos de kgCO<sub>2</sub>e (kilogramos de dióxido de carbono equivalente) o tonCO<sub>2</sub>e (toneladas de dióxido de carbono equivalente) (Chen et al., 2013).



Aunque es posible desarrollar una herramienta propia, lo más común es hacer uso de herramientas genéricas que realicen los cálculos respectivos. Dentro de las más utilizadas se encuentra SimaPro, Eco-it, Air.e LCA, Open LCA, GaBi, TEAM, UMBERTO, entre otras; las cuales permiten modelar productos y sistemas para la obtención de una gran cantidad de indicadores, incluida la huella de carbono (Cortés, 2015).

Las herramientas descritas anteriormente tienen sus bases de datos propias o permiten el acceso a otras disponibles. Una de las más relevantes es Ecoinvent publicada por primera vez en el 2003 en Suiza y se aplicó para países europeos. La herramienta tuvo un gran impacto, por lo que en el 2007 se lanzó la versión 2. La cantidad de usuarios aumentó, por lo que se vieron en la necesidad de recolectar datos que aplicaran a nivel global, incrementar el tamaño de la base de datos y así nació Ecoinvent 3 en el 2013, la cual es actualizada anualmente. Ecoinvent es una de las bases de datos más utilizadas por su información aplicable a todo el resto del mundo, fácil acceso, actualizaciones continuas y gran variedad de opciones para el usuario (Ecoinvent, 2013; Wernet, et al., 2016).

### **1.7. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

Los indicadores ambientales, como la huella de carbono, requieren de metodologías que permitan integrar los resultados obtenidos con un análisis del sistema del producto. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología empleada para evaluar los recursos utilizados y los impactos al ambiente asociadas a un producto, un proceso o una actividad, durante las etapas de su vida (International Standard Organization, 2006).

A los recursos empleados y la energía consumida empleados para producir un bien o servicio se le conocen como entradas, mientras que los residuos, los subproductos o los contaminantes resultantes luego de la producción se les identifican como salidas (Muralikrishna & Manickam, 2017). Por medio de esta técnica es posible recopilar un inventario de entradas y salidas dentro de los límites del sistema, evaluar los posibles

impactos ambientales relacionados a esas entradas y salidas, e interpretar esos resultados para obtener información y recomendaciones acordes al objetivo planteado (International Standard Organization, 2006; Massolo, 2015).

Esta herramienta permite tomar decisiones con la información obtenida, y es posible emplearla en conjunto con otras metodologías como la evaluación de riesgo o la evaluación del impacto ambiental. Igualmente, ayuda a disminuir costos o pérdidas económicas, presenta una planeación estratégica para la organización, brinda una mejor imagen a la empresa y así un mejor posicionamiento en el mercado (Massolo, 2015).

Los ACV se pueden diferenciar según el nivel de detalle que presente. Un ACV conceptual es de carácter cualitativo, ya que por medio de revisión literaria se identifican los potenciales impactos de mayor importancia para el ciclo de vida del producto. Por otro lado, un ACV simplificado toma datos de bases de datos o investigaciones previas para determinar los impactos que afectan durante el ciclo de vida del producto. Es una forma simplificada de evaluación, se centra en las etapas más relevantes. Por último, un ACV completo involucra un análisis detallado de maneja cualitativa y cuantitativa. Es muy común utilizar varios tipos de ACV en un solo análisis, debido a que no todas las etapas pueden requerir el mismo nivel de detalle. La escogencia del tipo de análisis queda a criterio del investigador, el tipo de producto y el alcance esperado (Azevedo, Oliveira, Pereira, & Reis, 2011).

Dentro de las técnicas más utilizadas para el desarrollo de un ACV se encuentra el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, el estándar británico PAS (Publicly Available Specification, por sus siglas en inglés) 2050 y la norma ISO 14040. Con respecto al Protocolo de GEI, en general se compone de estándares, protocolos y guías para cuantificar las emisiones de GEI de compañías privadas, de organizaciones del sector público, de actividades relacionadas al uso del suelo o uso forestal, y de productos. Dicho protocolo presenta una metodología

para la recolección de información y reporte de emisiones de GEI, así como una guía para cuantificar la reducción de GEI atribuido a programas de mitigación implementados en una compañía (Bhatia, et al., 2012).

Por otro parte, la norma británica PAS 2050 se utiliza para la verificación de la huella de carbono por medio del análisis de ciclo de vida del producto, Se puede diferenciar por dos tipos de ciclos de vida, el primero donde se considera que el ciclo de vida finaliza con la entrega del producto a otra organización que lo utiliza en la producción de un bien, y el segundo, cuando se contempla la etapa final como el momento en que el producto ha sido entregado al usuario final. Esta norma es muy detalla con respecto a los GEI y fuentes de emisión que se deben incluir, la manera en que se realizan las mediciones de las emisiones, los coeficientes de conversión que se deben utilizar en los cálculos y el período que se considera para el análisis (Asociación Española para la Calidad, 2019).

A pesar de que existen herramientas para la realización de ACV, la norma ISO 14040:2006 es la más utilizada por los investigadores para realizar este tipo de estudios. Dicha preferencia se debe a que son aceptadas a nivel internacional por parte de los productores de materiales y manufactura (Álvarez, 2014). Al ser esta la norma la más relevante para el presente proyecto, las siguientes secciones (1.7.1. Familia de normas ISO 14040, 1.7.2. Enfoque del Análisis de Ciclo de Vida, 1.7.3. Fases del Análisis de Ciclo de Vida y 1.7.4. Recopilación de datos) ahondan en sus lineamientos y características más importantes.

#### **1.7.1. Familia de normas ISO 14040**

Los primeros estudios basados en el ACV comenzaron en los años 60, pero no fue hasta 1989 cuando la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental le dio nombre a esta metodología y estableció sus bases iniciales. La primera guía que unificó los criterios, conceptos y dio un marco de referencia se publicó en 1992, el cual se utilizó como un código

internacional. Sin embargo, para llenar los vacíos que presentaba este código, la Organización Internacional de Normalización publicó la norma ISO 14040 (Álvarez, 2014).

La última revisión de esta norma se realizó en el año 2006, cuando se publicó la ISO 14040:2006, en la que se detallan los requisitos y las directrices para el ACV (Álvarez, 2014). La Norma ISO 14044:2006 muestra los requerimientos y las pautas para la aplicación en ACV. Esta última llegó a reemplazar las normas ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000 (Massolo, 2015).

Asimismo, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) ha publicado una especificación técnica de los pasos a seguir para obtener la huella de carbono asociada a productos. La ISO 14067:2018 proporciona un método para cuantificar y comunicar las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a bienes y servicios. Esta norma se propuso por primera vez en el 2008, pero no fue hasta el 2013 cuando se publicó. Su última actualización se realizó en el año 2018, siendo esta la última versión disponible. Esta metodología considera las emisiones de GEI en términos de dióxido de carbono equivalente y se siguen los pasos para realizar el ACV, pero con cambio climático como la única categoría de impacto. Es muy utilizada ya que provee lineamientos para una comunicación transparente de los resultados, y permite al público meta tomar decisiones (Sandí, 2018).

### **1.7.2. Enfoque del Análisis de Ciclo de Vida**

La metodología ACV puede presentar diferentes enfoques o límites según la parte de ciclo del producto donde se culmine el estudio, lo cual debe corresponder con el objetivo y alcance planteado desde el inicio, algunos de ellos son (Massolo, 2015):

- a) De la cuna a la tierra (*cradle to ground, cradle to gate*): Se analiza la vida del producto en estudio desde que nace hasta que llega a manos del consumidor y no abarca su

uso posterior. De esta forma, se analizan las actividades relacionadas a la materia prima, el transporte de la materia prima, la producción, el transporte del producto, y la distribución o la colación del bien (Han, Oneil, Bergman, Eastin, & Johnson, 2015).

- b) De la cuna hasta la tumba (*cradle to grave*): Se considera que los productos nacen y mueren, por lo que tienen un solo uso. Esta técnica es utilizada para conocer los impactos asociados a los productos, abarcando desde la adquisición del material, la manufactura, el consumo y la disposición final (International Standard Organization, 2006; García, 2013).
- c) De la cuna a la cuna (*cradle to cradle*): Se toma en cuenta que la materia prima de un producto se puede separar al final de su ciclo de vida y reutilizarse. Involucra el ciclo completo del producto, incluyendo la extracción y el procesado de materia prima, la producción, el transporte, la distribución, el uso, la reutilización, el mantenimiento, el reciclado y la disposición final (Ministry of Infrastructure and the Environment, 2011).

Existen otros tipos de ACV parciales donde se incluyen las emisiones de ciertas etapas aisladas de un producto. Sin embargo, este enfoque puede utilizarse en estudios de alta complejidad donde no es conveniente cuantificar la huella de carbono de todas las etapas de la vida del producto (Sandí, 2018).

### **1.7.3. Fases del Análisis de Ciclo de Vida**

Según la metodología propuesta por la norma ISO 14040:2006, el ACV se divide en cuatro fases principales, indicadas a continuación:

- a) Definición del objetivo y el alcance

En esta primera fase se incluye la definición y la delimitación del sistema que se va a estudiar, el alcance que se desea tener, el nivel de detalle requerido, y el objetivo del

proyecto. De esta forma, se puede organizar de una mejor manera el procedimiento por realizar, los datos que se requieren recopilar y las referencias para la expresión de resultados (Massolo, 2015).

Un objetivo podría ser, la comparación de dos o más productos con una misma función, la aplicación de la información recolectada para obtener beneficios en la comercialización o cumplir con reglamentaciones establecidas, entre otros (Massolo, 2015). Adicionalmente, se debe establecer una unidad funcional, la cual describe la función principal del sistema del producto, utilizada como unidad de referencia para que las entradas y salidas del sistema puedan ser normalizadas matemáticamente (International Standard Organization, 2006).

**b) Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)**

En esta fase se recopilan todos los datos de las entradas y las salidas. Durante el ICV se pueden detectar nuevos requisitos y limitaciones, los cuales podrían generar variaciones en la forma de recopilar los datos; razón por la cual en ocasiones es posible que se requiera una revisión del objetivo o alcance del estudio durante el desarrollo de la investigación (Torre, 2012; Massolo, 2015).

**c) Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)**

Según el alcance y el estudio que se desee realizar, en esta etapa se conoce y se evalúa la magnitud y la significancia de los impactos potenciales detectados para el sistema conforme a los resultados del inventario. Normalmente, se realiza una clasificación de las cargas ambientales en donde se les asignan diferentes categorías de impacto de interés para el ACV, o se puede seleccionar solamente una categoría de impacto para la evaluación. Algunas de las categorías de impacto más utilizadas son las de calentamiento global, consumo de recursos energéticos, reducción de la capa de ozono, eutrofización,

acidificación, consumo de materias primas y formación de oxidantes fotogénicos (Torre, 2012; Massolo, 2015).

Se procede con la caracterización de la información recolectada en el inventario para cada categoría seleccionada. Se requieren factores de emisión equivalentes para cuantificar todas las intervenciones ambientales en unidades del indicador seleccionado, por ejemplo el potencial de calentamiento global, en cual indica la capacidad de retención de calor que posee un GEI utilizando como referencia el dióxido de carbono (Massolo, 2015; Corporación Interamericana de Inversiones, 2018). Asimismo, se puede encontrar información en investigaciones oficiales o recopilaciones locales, tomando en cuenta que no existe un acuerdo internacional donde se definan los criterios para seleccionar este tipo de bases de datos (García, 2013).

**c.1)** La asignación de emisiones (conocida como *allocation* en inglés) se utiliza cuando distintos productos comparten algunas entradas y procesos, para así asegurar la asignación correcta de las emisiones que corresponden al producto en estudio. En los casos donde se deba aplicar la asignación es posible aplicar 3 métodos diferentes, los cuales se escogen dependiendo de la información disponible. Los mismos se muestran a continuación en orden de preferencia (International Standard Organization, 2013; García, 2013):

1. Propiedades físicas: Se calculan factores de asignación según la masa de cada subproducto comparado con la masa total. Además de la masa, es posible utilizar otras propiedades físicas, por ejemplo, el consumo energético.
2. Valor económico, por ejemplo, se puede utilizar el valor en el mercado de los materiales reciclados o de desecho con respecto con el valor del mercado de la materia prima original.
3. El número de usos subsecuentes del material reciclado.

Para el cálculo del coeficiente de asignación de un producto  $x$ , se utiliza la ecuación 2. La propiedad del producto  $P_x$  se refiere a una característica cuantificable física, por ejemplo, la masa, el contenido energético, el volumen, o no física como el valor del mercado, entre otras (Department for Business, Innovation and Skills, 2014).

$$C_{asigx} = \frac{P_x}{\sum_n P_x} \quad (2)$$

Donde,

$C_{asigx}$ : Coeficiente de asignación del producto  $x$ , adim

$P_x$ : Propiedad física o no física del producto  $x$ , unidad según la propiedad

$n$ : Cantidad de co-productos, adim.

Si aplica la asignación de emisiones mencionadas a la ecuación 1, se obtendría la ecuación 3 para el cálculo de las emisiones totales de un producto  $x$  (Li, Chen, & Ding, 2019).

$$E_x = F_x \cdot FE \cdot PGG_i \cdot C_{asigx} \cdot m_x \quad (3)$$

Donde,

$E_x$ : Emisiones de dióxido de carbono equivalente del producto  $x$ , kgCO<sub>2e</sub>

$F_x$ : Fuente de emisión del producto  $x$ , unidad según fuente de emisión/kg<sub>x</sub>

$FE$ : Factor de emisión, (kgCO<sub>2</sub>/unidad según fuente de emisión)

$PGG_i$ : Potencial de calentamiento global para la sustancia  $i$ , (kg<sub>i</sub>/kgCO<sub>2e</sub>)

$C_{asigx}$ : Coeficiente de asignación del producto  $x$ , adim

$m_x$ : Masa total del producto  $x$ , kg<sub>xtotal</sub>



Aunque los cálculos de asignación de emisiones se pueden realizar de manera manual, la gran mayoría de herramientas utilizadas para cálculo de huella de carbono y ACV o las bases de datos que estas contienen, incluyen los cálculos respectivos. Por ejemplo, el software GaBi utiliza un modelo de asignación por medio de contenido energético y eléctrico, y de energía térmica y distribución másica. El Modelo de Inventario de Ciclo de Vida de una Refería de Petróleo (PRELIM, por sus siglas en inglés) se basa en la separación de la producción en cada unidad del proceso y permite seleccionar entre propiedades másicas, de energía, valor del mercado y contenido de hidrógeno. Otro modelo es propuesto por Yang, en donde se considera el valor económico y el rendimiento másico de los co-productos en una refinería (Wildnauer, Mulholland, & Liddie, 2019).

Como se había mencionado anteriormente, Ecoinvent es una de las bases de datos más utilizadas y su última versión brinda 3 opciones de métodos para asignar emisiones, los cuales se detallan a continuación (Wernet, et al., 2016):

- 1) Asignación y corte por clasificación: Los resultados arrojados con este modelo no consideran los co-productos, los materiales reciclables, ni los materiales de desecho; minimizando así el incentivo al reutilizar materiales, ya que no generan ningún beneficio en la contabilización de emisiones. Separa los productos según la etapa de uso, ya sea primaria o secundaria. Dependiendo del producto aplican una asignación másica, exergética, de precio o basada en relaciones físicas de los procesos de producción.
- 2) Asignación en el punto de sustitución (APOS, por sus siglas en inglés): En este caso la asignación se expande a los procesos de producción y el tratamiento de subproductos, incluidos los desechos y el material reciclable, por lo que se prefiere antes que el modelo de asignación y corte por clasificación. Igualmente se utiliza asignación másica, exergética, de precio o basada en relaciones físicas.
- 3) Asignación consecuente, a largo plazo y a pequeña escala: Se basa en un enfoque de sustitución. Aplica para procesos donde un subproducto puede sustituir un bien o

servicio y se cuenta como una entrada negativa. Es un modelo más básico que los anteriores, ya que se centra mayormente en promedio de datos y al contabilizar las entradas negativas no requiere la asignación de emisiones.

**d) Interpretación de los resultados**

Todos los resultados obtenidos de las fases anteriores se relacionan y se discuten para cumplir con el objetivo y el alcance deseado. De esta forma, se pueden aportar conclusiones y recomendaciones que permitan determinar, por ejemplo, la fase del ciclo de vida donde se presentan los mayores impactos ambientales, la manera en que pueden mejorarse o, en los casos donde se comparan distintos productos, es posible seleccionar el que posea una menor cantidad de emisiones de GEI, entre otros (Torre, 2012; Massolo, 2015).

**1.7.4. Recopilación de datos**

Los AVC se basan en la información recolectada, por lo que según la ISO 14044 la recopilación de datos debe realizarse dentro del alcance y objetivo del estudio. En general, la información incluye una mezcla de datos medidos, calculados o estimados (International Standard Organization, 2006). Las fuentes primarias de información se obtienen directamente del proceso en estudio, por lo que se cuantifican las entradas o las salidas del proceso en el sitio para los equipos o las operaciones (Scott, Hendrickson, & Matthews, 2015).

Sin embargo, existen situaciones en las que no es posible recolectar la información de fuentes primarias, por lo que se utilizan las fuentes secundarias como alternativa. Algunas de estas opciones son los Análisis de Ciclo de Vida realizados por otros autores sobre el mismo producto en estudio, la literatura, las bases de datos, entre otros (Scott et al., 2015). Según la norma ISO 14067, aparte de la razón mencionada anteriormente, las fuentes secundarias también se pueden utilizar para recolectar la información de procesos menos relevantes involucrados dentro del alcance del estudio. Se espera que estos procesos

presenten una menor contribución de GEI dentro del ciclo de vida (International Standard Organization, 2013).

En un reporte de GEI se deben incluir los datos de emisiones según el tipo de fuente emisora. Se han determinado tres categorías para las emisiones según su fuente de emisión de la siguiente manera (Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, 2011; García, 2013):

- a) Alcance 1: Se refiere a las emisiones de GEI provenientes de fuentes directas pertenecientes o controladas por la organización. En este caso se incluyen las emisiones generadas por una caldera, el consumo de combustible por vehículos propios, entre otros. La información englobada dentro de este alcance se deben incluir obligatoriamente dentro del reporte de GEI.
- b) Alcance 2: Involucra las emisiones de GEI de fuentes indirectas derivadas de la generación de electricidad adquirida por la organización para uso propio. En este caso, la empresa generadora de energía vende sus servicios a la organización en estudio. Al igual que el caso del alcance 1, las emisiones involucradas dentro del alcance 2 se deben agregar obligatoriamente en el reporte de GEI.
- c) Alcance 3: Emisiones no incluidas dentro del alcance 2 y son consecuencia de las actividades de la organización o el producto, pero provienen de fuentes no controladas. Algunos ejemplos son la extracción y la producción de materias primas, el transporte de materias primas, la generación de residuos, entre otros. A diferencia de los alcances anteriores, estas emisiones se incluyen dentro del reporte de GEI solamente si el investigador lo considera pertinente y tiene todos los datos requeridos para los cálculos.

## **1.8. Estimación de huella de carbono y ACV en pavimentos**

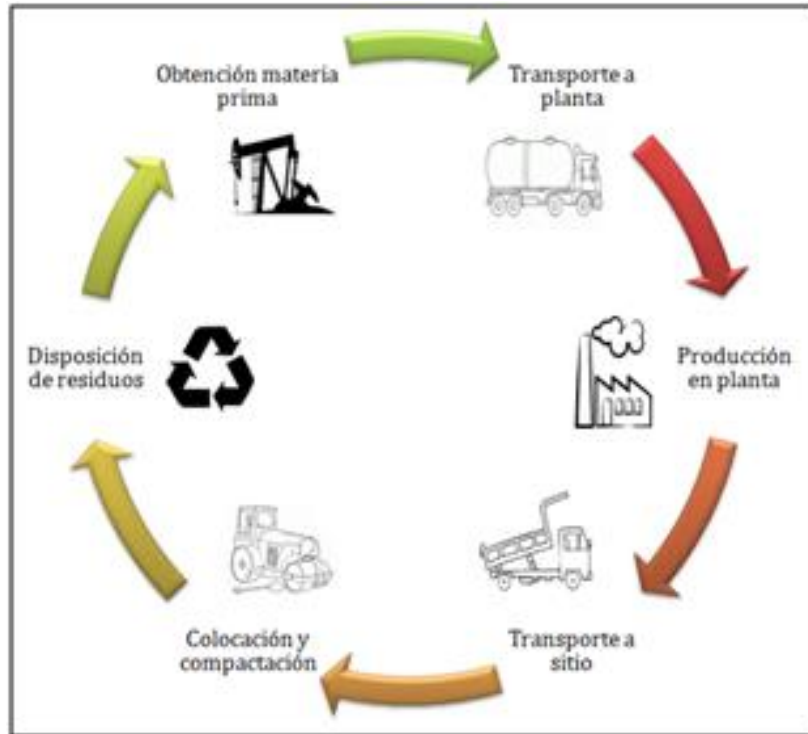
La industria de construcción de carreteras genera una cantidad significativa de GEI, emitidos mayormente a los materiales, el calentamiento de la materia prima, los combustibles y el suministro de energía. Por esta razón, utilizando un análisis de ciclo de vida y examinando la huella de carbono, se pueden obtener los valores e información sobre las emisiones de GEI generadas durante este proceso, y recomendaciones para mitigar el cambio climático (Kar, Behl, Shukla, & Jain, 2015; Hatmoko J. , Hidayat, Setiawati, & Prasetyo, 2018).

Se han realizado estudios sobre pavimentos flexibles, pavimentos de concreto y asfalto convencionales, pavimentos verdes, en donde se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para la cuantificación de la huella de carbono. En todos los casos es necesario estudiar cada etapa de la vida del producto según el enfoque esperada para cada análisis (Kar et al, 2015; Hatmoko, 2018).

### **1.8.1. Delimitación de las etapas del ciclo de vida para mezclas asfálticas**

Existen muchas maneras de analizar el ciclo de vida de un producto, y la escogencia de las etapas para incluir en el estudio depende de los límites de la investigación. Sin embargo, es posible agrupar actividades y categorizarlas dentro de las principales fases para un producto (Mukherjee, 2016).

Las etapas principales del ciclo de vida relacionadas a una mezcla asfáltica se detallan en la Figura 4. De esta manera, se destacan las fases como la obtención de materia prima (asfalto, agregados y polímeros, si aplica), el transporte de los materiales a la planta, la producción de la mezcla asfáltica, el traslado de la mezcla al sitio del proyecto, la colocación y compactación de la mezcla y la disposición de residuos. Cada una de ellas engloba una serie de operaciones que se deben analizar para cuantificar el impacto ambiental en estudio (Mukherjee, 2016; Espinoza & Campos, 2017).



**Figura 4.** Esquema del ciclo de vida de mezclas asfálticas (Espinoza & Campos, 2017)

La etapa de uso de la carretera se analiza en una baja cantidad de este tipo de estudios. Esta fase involucra el consumo de combustible debido a propiedades del pavimento como la aspereza o estructura, la iluminación de las vías, el impacto del albedo, la carbonatación del pavimento o la lixiviación al suelo (daños al ambiente), aunque varios análisis sí incluyen las labores relacionadas al mantenimiento. No obstante, la cuantificación de emisiones en estas actividades es difícil, por lo que se requiere ahondar en estos temas y, en la creación de modelos que describan su comportamiento de una manera más acertada y estandarizada (Thiel, Stengel, & Gehlen, 2014).

El final de la vida (EOL, por sus siglas en inglés) de un pavimento es de las fases menos estudiadas ya que los datos se deben estimar. La cuantificación de emisiones en esta etapa se lleva a cabo por medio de bases de datos y herramientas que ayudan a recopilar la información necesaria. En ocasiones se le llama disposición de residuos, lo cual no es

totalmente cierto, ya que involucra más actividades como la demolición, el fresado, el reciclaje del material, el transporte de desechos, el procesamiento de los desechos, y la disposición de desechos (Mukherjee, 2016; Espinoza & Campos, 2017).

Todas las herramientas, las metodologías, los procesos involucrados, los cambios de materiales y demás temas expuestos, tienen el objetivo final de alcanzar un desarrollo sostenible. El análisis de la huella de carbono en conjunto con el ACV se ha tomado más relevancia y es aplicable a cualquier producto, servicio u organización. La información obtenida permite obtener conclusiones y recomendaciones que pueden utilizarse con propósitos investigativos, elaboración de políticas, generación de información para empresas relacionadas con el área de manufactura, entre otros (Dong & Hauschild, 2017).



## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO**

En el presente capítulo se estará delimitando el caso de estudio relacionado al análisis del ciclo de vida para el asfalto convencional, asfalto verde y asfalto modificado. Se especifican los objetivos que se desean alcanzar, se justifica la selección de polímeros, la descripción de los escenarios en estudio, la metodología general, los aspectos relacionados a la finalidad del análisis del ciclo de vida y el alcance. De esta manera, se muestra un panorama general de lo que va a exponer en el resto del estudio y los objetivos planteados.

### **2.1. Objetivos de la investigación**

#### **2.1.1. Objetivo General**

Evaluar la huella de carbono del asfalto verde, asfalto modificado y asfalto convencional en Costa Rica, a través de un análisis de ciclo de vida como un aporte para la mitigación del cambio climático.

#### **2.1.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar el inventario de ciclo de vida para el asfalto verde, el asfalto convencional y el asfalto modificado.
- Determinar la huella de carbono para el asfalto verde, el asfalto convencional y el asfalto modificado.
- Proponer recomendaciones para la mitigación del cambio climático según el ACV del asfalto verde, asfalto convencional y asfalto modificado.

### **2.2. Descripción del caso de estudio**

El caso de estudio se centra en la construcción de tramos de carretera pavimentada con mezcla asfáltica caliente en el LanammeUCR, San Pedro, Costa Rica, con fines investigativos, según las características determinadas en el Cuadro II.



**Cuadro II.** Características de cada tramo construido en el LanammeUCR utilizando diferentes mezclas asfálticas

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Longitud del tramo /(m)	22,04
Ancho del tramo /(m)	2,05
Espesor de la capa /(m)	0,1
Masa de mezcla asfáltica por tramo /(kg)	12 135

Dentro de la presente investigación se estudian tres tipos de mezclas asfálticas diferentes, detalladas en el Cuadro III.

**Cuadro III.** Descripción de materiales utilizados en cada escenario analizado

<b>Escenario 1</b> <b>Asfalto convencional</b>	<b>Escenario 2</b> <b>Asfalto verde</b>	<b>Escenario 3</b> <b>Asfalto modificado</b>
Asfalto original	Asfalto original	Asfalto original
Agregados (polvo de piedra y quintilla)	Agregados (polvo de piedra y quintilla)	Agregados (polvo de piedra y quintilla)
-	PET reciclado (1% de la masa de los agregados)	Elvaloy (1,2% de la masa del asfalto)
-	-	PPA (0,2% de la masa del asfalto)

Los tramos con las condiciones detalladas en el escenario 1 y el escenario 2, se construyeron en el LanammeUCR. El tramo con las características del escenario 3 no se construyó, sin embargo, puede analizarse dentro del ACV ya que se toman datos base del escenario 1 y, se ajustan las etapas del ciclo de vida que difieran del escenario 1.

En términos generales, dentro del presente análisis se utilizaron los mismos datos de proveedor de asfalto original para los tres escenarios, al igual que los agregados. El PET reciclado proviene de botellas plásticas, y es agregado en la mezcla asfáltica por medio de un método seco. Por otra parte, el Elvaloy y PPA se adquieren por medio de un mismo proveedor y se agregan a la mezcla asfáltica utilizando un método húmedo. Es importante destacar que se le llama asfalto convencional a la mezcla asfáltica con asfalto original

(asfalto no modificado), asfalto verde a la mezcla asfáltica con PET reciclado y, asfalto modificado a la mezcla asfáltica con Elvaloy y PPA como polímeros modificantes.

El estudio se enfoca en la comparación de estos tres escenarios, específicamente en la generación de información para la toma de decisiones y la futura escalación de resultados a proyectos de mayor magnitud en el país.

### **2.2.1. Descripción de las empresas involucradas en el proyecto**

El LanammeUCR se encuentra en proceso de investigación de asfaltos verdes, razón por la cual surge la presente investigación. El caso de estudio involucra las actividades relacionadas a la adquisición de materia prima, el reprocesamiento de los materiales reciclados, la producción de la mezcla asfáltica y la construcción de los tramos. Dichas actividades se llevan a cabo en colaboración con diferentes empresas y son las que proporcionan los datos por medio de los cuestionarios presentados en el Apéndice Cuestionarios; las mismas se describen a continuación.

- RECOPE es la entidad encargada de importar productos derivados del petróleo en Costa Rica. Por tal razón, la información relativa a combustibles como diésel, gasóleo y queroseno, así como el asfalto, fue proporcionada por parte de esta empresa.
- Los agregados pétreos, polvo de piedra y quintilla, se obtuvieron de un quebrador localizado en la zona de La Marina Guápiles. Son los encargados de extraer el material, transportarlo a la planta, triturarlo y tamizarlo.
- El plástico reciclado se adquirió de una municipalidad en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica y se reprocesó en una planta situada en San Antonio de Belén, Heredia.
- El transporte de materia prima, la modificación del asfalto y la producción de la mezcla asfáltica se llevó a cabo en una planta instaurada en el Coyol, Alajuela.
- La construcción de los tramos estudiados se realizó en las instalaciones del LanammeUCR, San Pedro, San José. El encargado de dicha construcción fue la

empresa productora de mezcla asfáltica. En la sección de Anexos se muestran fotografías capturadas durante la construcción.

### **2.3. Metodología general**

La investigación se divide en cuatro grandes secciones. Primeramente se presenta el fundamento teórico, seguido de la delimitación del caso de estudio, el inventario del análisis de ciclo de vida incluyendo el desarrollo de la herramienta para cuantificar la huella de carbono, el análisis de los resultados, las comparaciones con otros ACV relacionados al caso de estudio y las alternativas para la mitigación del cambio climático.

#### **Desarrollo de los fundamentos teóricos**

Se realizó un análisis de referencias bibliográficas para conformar los fundamentos teóricos concernientes al análisis de ciclo de vida según el caso de estudio para varios tipos de asfaltos. Se utilizaron fuentes confiables como bases de datos de la Universidad de Costa Rica, artículos, revistas en línea, investigaciones previas, libros especializados, entre otros.

#### **Delimitación del caso de estudio**

Con respecto a la descripción del caso de estudio se contactó con personal del LanammeUCR para determinar el diseño del proyecto, sus dimensiones, empresas involucradas, y cualquier otra información necesaria para las subsecciones en el Capítulo 2.

Específicamente, el desarrollo de la sección 2.4 y 2.5 se basó en la norma ISO 14040:2006 “Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Principios y marco de referencia”. En conjunto, se utilizó la norma ISO 14067:2018 “Gases de efecto invernadero – Huella de carbono de productos – Requisitos y directrices para cuantificación”. Se utilizan ambas normas debido a que la ISO 14040:2006 abarca de manera general la realización de un análisis de ciclo de vida, mientras que la norma 14067:2018 está enfocada hacia la huella de carbono de los productos (International Standard Organization, 2006; International Standard Organization, 2018).

### **Desarrollo del inventario de ciclo de vida**

El Capítulo 3 se basó también en la norma ISO 14040:2006 e ISO 14067:2018 para la identificación de las fuentes, la asignación de emisiones, la recopilación de datos, y como fundamento para el modelamiento de los datos del inventario y base de datos.

La identificación de fuentes emisoras de GEI se realizó al estudiar cada etapa del ciclo de vida del producto y por medio de revisión literaria sobre ACV en mezclas asfálticas. Asimismo, se consultó a expertos en el tema del LanammeUCR y colaboradores de las empresas descritas en la sección 2.2.1 sobre los procesos involucrados en el ciclo de vida de una mezcla asfáltica. Se desarrollaron los cuestionarios para recopilar la información necesaria, los cuales se especifican en el Apéndice sección Cuestionarios.

La recolección de datos se realizó por medio de fuentes primarias y secundarias. Los datos primarios se obtuvieron por medio de cuestionarios de acuerdo con cada sub-proceso involucrado en el estudio, a través de comunicación por vía telefónica o correo electrónico con los encargados de producción, y otras consultas realizadas personalmente. Por otro lado, para obtener los datos secundarios se recurrió a estudios previos según la literatura y bases de datos. La información obtenida de ambas fuentes fue utilizada para modelar la unidad del proceso en el estudio de la huella de carbono en la herramienta desarrollada. Seguidamente se detalla la manera de recolección para cada tipo de datos.

- Datos primarios

Se realizó una serie de cuestionarios sobre la información general de producción, prácticas usuales, técnicas requeridas, equipo, consumo de combustible, entre otros. Los mismos se enviaron a productores locales según cada subproceso de interés a los encargados en las empresas descritas en la sección 2.2.1. Cuestionarios sobre información general y otros más específicos, fueron de ayuda para la recolección de la información.

Con respecto al asfalto, se obtuvo la información de RECOPE. Se contactó vía telefónica y correo electrónico. El material reciclado PET y su manufactura se consultó a los encargados en la planta reprocesadora de plástico; los datos se obtuvieron por vía telefónica y por medio del cuestionario enviado vía electrónica. La respuesta al cuestionario relacionado a los agregados, específicamente, el polvo de piedra y quintilla, se obtuvo vía correo electrónico por parte del quebrador localizado en Guápiles. Para la producción de la mezcla asfáltica y construcción de los tramos de carretera se realizó el cuestionario al encargado de la planta productora de mezcla asfáltica en el sitio de la construcción (laboratorio del LanammeUCR). Otros detalles se consultaron vía telefónica y por correo electrónico.

Los cuestionarios se encuentran relacionados a la producción de agregados, la producción de asfalto, el reprocesamiento del material reciclado, la producción de mezcla asfáltica y la construcción de la carretera, los cuales se adjuntan en el Apéndice sección A. La recolección total de todos estos datos se llevó a cabo desde marzo del 2019 hasta enero del 2020.

- Datos secundarios

Debido a las limitaciones físicas, de tiempo o de disponibilidad, no se puede obtener toda la información requerida por medio de los cuestionarios mencionados anteriormente, esta es una situación común en los ACV. De esta manera, se procedió a utilizar fuentes secundarias como la base de datos Ecoinvent 3.0, investigaciones previas que apliquen a la región de estudio e informes emitidos por el Instituto Meteorológico Nacional (2019). Dentro de las investigaciones previas se encuentra la de Young, Morelli y Hawkins (2017), Ventikos et al. (2016), Kommalapati et al. (2017), Sorata et al. (2017) y Wildnauer et al. (2019), La base de datos utilizada en la herramienta de cuantificación de la huella de carbono se desarrolló a partir de este tipo de fuentes.

Posteriormente, el modelamiento de los datos del inventario para la obtención de la huella de carbono se realizó por medio de una herramienta desarrollada en una hoja de cálculo

por medio de la herramienta de Excel. Se observaron otras herramientas de este tipo para determinar las pautas más importantes en el diseño. Se realizó una búsqueda de las metodologías de cálculo para la huella de carbono enfocada a productos y, se dividió según las etapas más relevantes para el producto en cuestión. Cada etapa se dividió en las actividades involucradas y al final se recolectó toda la información para obtener un resultado que abarque todo el ciclo de vida del producto.

### **Análisis e interpretación de los resultados**

Posterior a la obtención de los valores cuantitativos, se analizaron los resultados globales. Aunado a esto se realizó un análisis por cada etapa del ciclo de vida, el efecto de materias primas específicas, como PET reciclado, mezcla de Elvaloy y PPA, agregados y asfalto. Se procedió con una comparación de varios ACV relacionados al caso de estudio y realizados a nivel global, los cuales se especifican en la sección 4.2. Por último, se muestran consideraciones de utilidad para el público meta, junto con alternativas para la mitigación del cambio climático. Se obtuvieron las conclusiones y recomendaciones a partir de estos resultados generados, como lo indica la norma ISO 14040:2006.

## **2.4. Finalidad del ACV según la ISO 14040:2006**

### **Finalidad del ACV**

La finalidad del presente análisis de ciclo de vida es cuantificar y comparar las emisiones de gases de efecto invernadero, por medio de la huella de carbono, para un proyecto donde se compara el asfalto convencional, el asfalto modificado con Elvaloy y PPA, y el asfalto verde (modificado con botellas recicladas de PET). Asimismo, se espera que sea un aporte para la mitigación del cambio climático.

Como aclaración, esta finalidad se determina siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14040:2006 y está exclusivamente relacionada al ACV de los productos mencionados. El proyecto en general involucra etapas aparte como la revisión bibliográfica, el desarrollo de

una herramienta para la cuantificación de la huella de carbono y la comparación de los resultados con los ACV realizados por otros autores, razón por la cual sus objetivos se especificaron en la sección 2.1.

### **Aplicación prevista**

La aplicación prevista de estudio reside en realizar recomendaciones para disminuir los impactos generados durante la vida de producción de cada tipo de asfalto estudiado, aportar criterios de selección de estos materiales y generar información sobre la emisión de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de los materiales en estudio.

### **Justificación para realizar el estudio**

El análisis de ciclo de vida pretende contribuir por medio del ámbito académico al ambiente político del país, relacionado al Plan Nacional de Descarbonización, Compromiso País 2018-2050, aspirando ser una economía verde donde se promueve el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

Además, se espera proporcionar conocimiento que contribuya a la mitigación del cambio climático al comunicar los impactos de los proyectos de pavimentos y generar recomendaciones para situaciones en las que se desee utilizar este tipo materiales o proyectos que beneficien al medio ambiente.

### **Público objetivo**

El público meta al que se dirige el Análisis de Ciclo de Vida se centra en futuros usuarios de los materiales involucrados (asfalto verde, asfalto modificado y asfalto convencional), ya sean organizaciones con o sin fines de lucro o entidades gubernamentales. Aunado a esto, el estudio será un aporte a las investigaciones realizadas por el LanammeUCR sobre estos tipos de asfalto relacionado con el área de sostenibilidad.

## **2.5. Alcance según la ISO 14040:2006**

Una selección apropiada del alcance permite obtener un estudio más preciso, fácil de comprender y una mejor recolección de datos, por lo cual se detallan a continuación las secciones requeridas según la norma ISO 14040:2006.

### **Sistema del producto**

Los diferentes escenarios evaluados y sus respectivos materiales en cada caso se detallan en la sección 2.2.

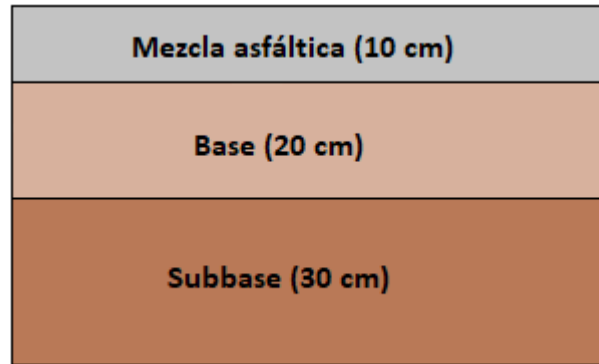
Para el caso de estudio del escenario 2, la escogencia 1% de PET (sobre el peso de los agregados) se basa en el diseño de mezcla realizado por investigadores del LanammeUCR, los cuales determinaron que esa era la cantidad recomendada para el buen desempeño del producto final. De esta manera, el proyecto de construcción del tramo se realizó con este porcentaje de plástico reciclado.

Asimismo, la selección de los agentes modificantes y sus respectivas proporciones del escenario 3, específicamente 1,2% de Elvaloy y 0,2% de PPA, se deben a que es un tipo de asfalto utilizado en el país y estudiado por parte del LanammeUCR. Este tipo de mezcla asfáltica se encuentra en la carretera de La Abundancia – Florencia, en San Carlos, Costa Rica, demostrando así que su producción e implementación es posible para el contexto geográfico del presente estudio (Espinoza, et al., 2019).

El alcance de este trabajo incluye la capa identificada como mezcla asfáltica (capa de asfalto) mostrada en la Figura 5. Esta capa corresponde al asfalto original (no modificado para el escenario 1, asfalto verde (PET reciclado) para el escenario 2 y asfalto modificado (Elvaloy y PPA) para el escenario 3. Se excluye la base y sub-base del sistema de estudio, ya que estas capas utilizarían los mismos materiales, las mismas cantidades y procesos de



producción para los tres casos. De esta forma, ambas capas generarían las mismas emisiones al momento de cuantificarlas sin importar el escenario.



**Figura 5.** Sección transversal del pavimento del tramo construido en el LanammeUCR

### **Unidad funcional y unidades de medición**

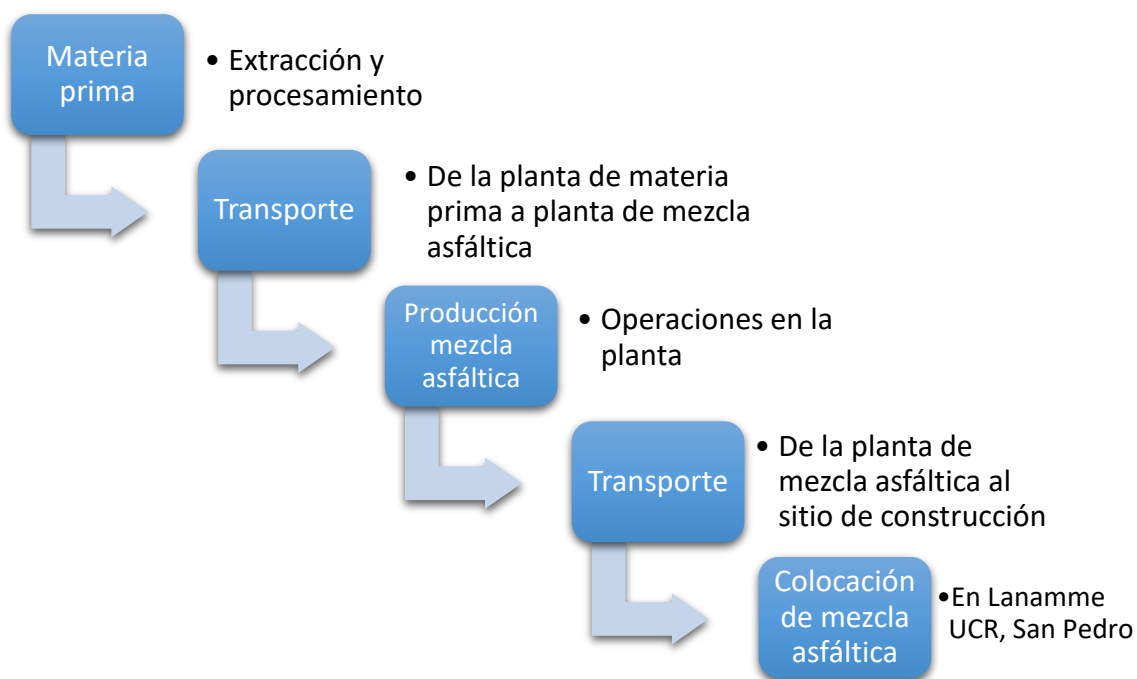
La unidad funcional determinada para este estudio corresponde a 1 tonelada de mezcla asfáltica. Asimismo, los resultados de la huella de carbono se van a reportar en unidades de kilogramos de dióxido de carbono equivalentes ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ ) por tonelada de mezcla asfáltica, según lo recomienda la norma ISO 14067 para la cuantificación de la huella de carbono (International Standard Organization, 2018). Según la norma ISO 14040:2006 (2006) en esta sección se debe incluir la unidad funcional y las unidades en las que se va a medir, por lo que la justificación de su escogencia se basa en el análisis desarrollado en la sección 4.2.1.

### **Límites del sistema**

El sistema en estudio se va a delimitar a un enfoque de la cuna a la tierra (*cradle to ground*), el cual incluye toda la adquisición de materia prima, operaciones en la planta, transporte, y actividades de construcción de la carretera (colocación en sitio), como se especifica en la Figura 6.

Este enfoque se escoge debido a que las etapas más significativas en los ACV sobre pavimentos asfálticos normalmente corresponden a la obtención de materia prima, la

producción de mezcla asfáltica y la construcción de la carretera, de acuerdo con el análisis del apartado 4.2.2. Comparación de las etapas del ciclo de vida estudiadas.



**Figura 6.** Esquema de los límites del sistema para el estudio

Los impactos relacionados a la mano de obra (como el transporte de los obreros al lugar de construcción) o la infraestructura (como la fabricación de la maquinaria de construcción o transporte de estos equipos al sitio de colocación) no se toman en cuenta debido a que sus impactos generados no se consideran en los ACV sobre pavimentos (Santero, Masanet, & Horvath, 2010).

Para este estudio se considera que el 95% de los impactos ambientales relacionados a la cuantificación de la huella de carbono son incluidos, conocido como criterio de corte, y relacionado a un 95% de confianza utilizado dentro de este tipo de ACV (Wernet, et al., 2016).

El alcance geográfico del proyecto se centra dentro del contexto de Costa Rica.

### **Información y calidad de la información**

La información recolectada es específica del sitio de estudio (Costa Rica) y, en los casos que no se encontraba disponible para el país, se buscaron datos regionales. Se realizaron cuestionarios para obtener la información requerida por parte de la empresa constructora o productoras de materia prima para el proyecto en construcción. Las fuentes de información anteriores se clasifican como primarias.

Los datos que no se podían recolectar por medio de cuestionarios, se obtuvieron a través de fuentes secundarias como Ecoinvent 3.0 o información de la literatura adaptada a la región de estudio.

- **Asignación de emisiones**

La asignación de emisiones se utiliza cuando distintos productos comparten mismas entradas o procesos. En este caso, la asignación de emisiones aplica para los productos derivados del petróleo utilizados dentro del estudio, como lo son el diésel, el gasóleo, el asfalto y polímeros, como el caucho sintético, Elvaloy, PEAD, PET, SBS y SBR. Asimismo, para los diferentes tipos de agregados, ya que provienen de una misma fuente. En la sección 3.3 se detalla minuciosamente el análisis de la aplicación de asignación de emisiones para los materiales mencionados anteriormente.

- **Suposiciones**

Según la norma ISO 14040:2006 (2006) es necesario indicar las suposiciones generales que van a utilizarse durante el desarrollo del ACV. Asimismo, la norma ISO 14067:2018 (2018) indica que las suposiciones se determinan por parte del investigador u organización que

esté realizando el estudio. De esta manera, Las suposiciones utilizadas en este Análisis de Ciclo de Vida se detallan a continuación:

- Todos los productos derivados del petróleo, como diésel, gasóleo y asfalto, son importados de la Costa del Golfo de Estados Unidos, correspondiente a la zona PADD 3.
- Se consideró un busque asfaltero Panamax en el transporte marítimo del asfalto desde Estados Unidos hasta Costa Rica.
- En la etapa de construcción, no se toma en cuenta las emisiones generadas por los atrasos en el tráfico debido a que se construyó en el Laboratorio de Pavimentos a Escala Natural del LanammeUCR el LanammeUCR.
- Se excluye del sistema las capas de base y sub-base, debido a que estas son una constante para la base de cálculo que se está utilizando.
- Con respecto a los materiales como el PET recolectado de desechos, se asume que es la primera vez en que va a ser reciclado, ya es imposible trazar la procedencia y si el material utilizado ha sido reciclado previamente.
- Para la producción del asfalto modificado con Elvaloy y PPA, se considera la producción con una planta eléctrica y otra de combustible.

- **Limitaciones**

De la misma manera que con las suposiciones, la norma ISO 14040:2006 (2006) solicita indicar las limitaciones generales que van a utilizarse durante el desarrollo del ACV. Igualmente, la norma ISO 14067:2018 (2018) indica que las limitaciones se determinan por parte del investigador u organización que esté realizando el estudio, y que las mismas sean consistentes con el objetivo del estudio. Se presentan las siguientes limitaciones para el análisis de ciclo de vida de la presente investigación.

- El impacto ambiental considerado en el estudio es el resultado de los gases de efecto invernadero por medio de la huella de carbono. Otros impactos como los generados

por la energía, la acidificación, el smog, el agotamiento de la capa de ozono, entre otros, no son considerados debido a que se salen del alcance de la investigación.

- El estudio se limita a un enfoque de la cuna a la tierra, por lo que no se deben tomar en cuenta etapas como el uso, el reciclaje o la disposición final del producto.
- La investigación toma en cuenta aspectos ambientales, no sociales ni económicos, los cuales también deben tomarse en cuenta para una toma de decisiones con respecto a la infraestructura vial.
- La recolección de información relacionada al transporte marítimo del asfalto se ve limitada por la empresa suministradora de este material, ya que por términos de privacidad no brindan estos datos.
- La recopilación de información por parte de fuentes primarias se ve limitada por la comunicación entre el investigador y las empresas encargadas de otorgar estos datos y los tiempos de espera al recibir respuestas.

### **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA PARA EL CASO DE ESTUDIO**

El este capítulo se detallan las fuentes de emisión de GEI, la manera en que se recopiló la información para el inventario de GEI, el método de asignación de emisiones utilizado y la manera en que se modelaron los datos obtenidos.

#### **3.1. Identificación de fuentes de emisión (entradas y salidas)**

A continuación se enlistan las fuentes de emisión de GEI según los procesos relevantes para la cuantificación de la huella de carbono de los tres escenarios estudiados, excepto en los casos donde se indique la aplicación a algún escenario específico. Su selección se basó en la experiencia por parte del personal del LanammeUCR realizando ACV a pavimentos (Espinoza, et al., 2019).

##### **a) Producción y procesamiento de materia prima**

###### **a.1) Producción de asfalto original**

Extracción y refinamiento del petróleo en Estados Unidos (emisiones de GEI debido al proceso natural, consumo de combustible y de electricidad).

Transporte marítimo del asfalto desde puerto en Estados Unidos a Moín, Costa Rica (Consumo de combustible).

Transporte terrestre del asfalto desde Puerto Moín a planta de RECOPE en Moín (Consumo de combustible).

Almacenamiento del asfalto en la planta de RECOPE en Moín (Consumo de combustible).

###### **a.2) Extracción de agregados**

Extracción y procesamiento de agregados por el quebrador en Guápiles (Consumo de combustible y electricidad).

Transporte del lugar de extracción de los agregados a la planta (Consumo de combustible).

**a.3) Material reciclado (aplica solamente para el escenario 2)**

Adquisición y reprocesamiento de botellas PET recicladas por parte de la empresa reprocesadora de plástico (Consumo de electricidad).

Transporte de botellas PET a la planta productora de mezcla asfáltica (Consumo de combustible).

**a.4) Polímeros (aplica solamente para el escenario 3)**

Producción del polímero Elvaloy y PPA.

**b) Transporte de materia prima a la planta de mezcla asfáltica**

**b.1)** Transporte del asfalto de RECOPE en Moín a Pavicen en El Coyal (Consumo de combustible).

**b.2)** Transporte de agregados del quebrador en Guápiles a planta productora de mezcla asfáltica en El Coyal (Consumo de combustible).

**b.3)** Transporte de PET triturado de planta reprocesadora de plástico en Belén a planta productora de mezcla asfáltica en El Coyal (Consumo de combustible). Aplica solamente para el escenario 2.

**b.4)** Transporte de Elvaloy y PPA a planta productora de mezcla asfáltica en El Coyal (Consumo de combustible). Aplica solamente para el escenario 3.

**c) Operaciones en planta – producción de mezcla asfáltica**

**c.1)** Almacenamiento del asfalto original previo a su uso en la mezcla asfáltica (Consumo de combustible).

**c.2)** Modificación de asfalto (Consumo de combustible o electricidad). Aplica para el escenario 3.

**c.3)** Funcionamiento del quemador en la planta de producción de mezcla asfáltica (Consumo de combustible).

**c.4)** Producción de mezcla asfáltica a alta temperatura (Consumo de combustible), diseño de la mezcla (contenido de asfalto, de agregado y polímeros modificantes).

**d)** Transporte de la mezcla asfáltica al sitio

**d.1)** Vagonetas con mezcla asfáltica desde la planta de planta productora de mezcla asfáltica en El Coyol hasta al sitio de construcción en el LanammeUCR, San Pedro (Consumo de combustible).

**e)** Actividades de construcción en sitio

**e.1)** Equipo de construcción como pavimentadora y rodillo compactador (Consumo de combustible).

### **3.2. Recolección de datos para el inventario**

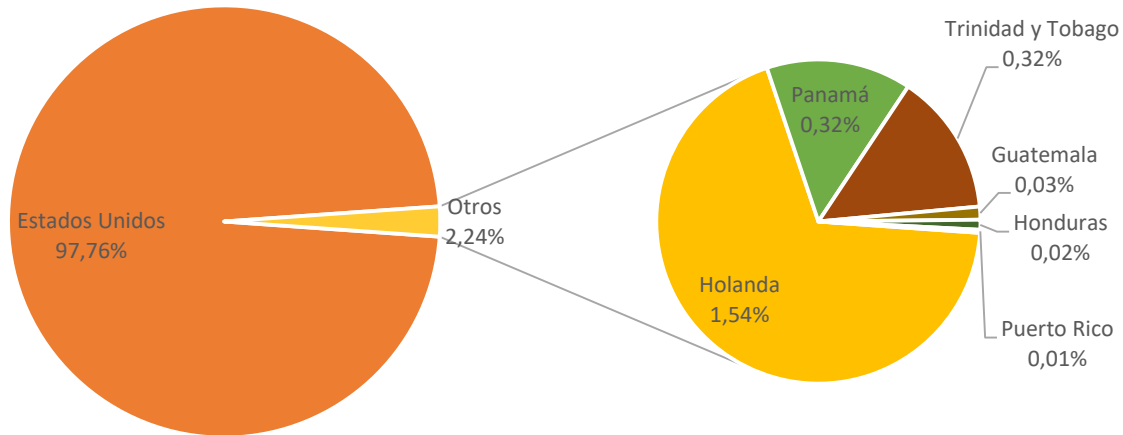
Seguidamente se detalla un resumen de los principales procesos involucrados en el ciclo de vida del producto, en donde se especifican las fuentes de los datos y los principales supuestos para el desarrollo del modelo del caso de estudio. Los datos recolectados se detallarán posteriormente en la sección 3.4.

#### **3.2.1. Productos derivados del petróleo**

Dentro del ACV se utilizan productos derivados del petróleo como asfalto, búnker, diésel y gasóleo para la producción de electricidad o como materia prima, razón por la cual es necesario conocer el lugar de proveniencia de los mismos, Debido a que en Costa Rica no se extrae ni se refina petróleo, todos sus productos derivados son importados por parte de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), incluidos el asfalto, diésel y gasóleo. Según los Datos Estadísticos Anuales de Importación de RECOPE, en la Figura 7 se indican los países y proporciones de los barriles importados de productos derivados del petróleo (RECOPE, 2018b). Debido a que el 97,76% de los barriles de productos derivados del

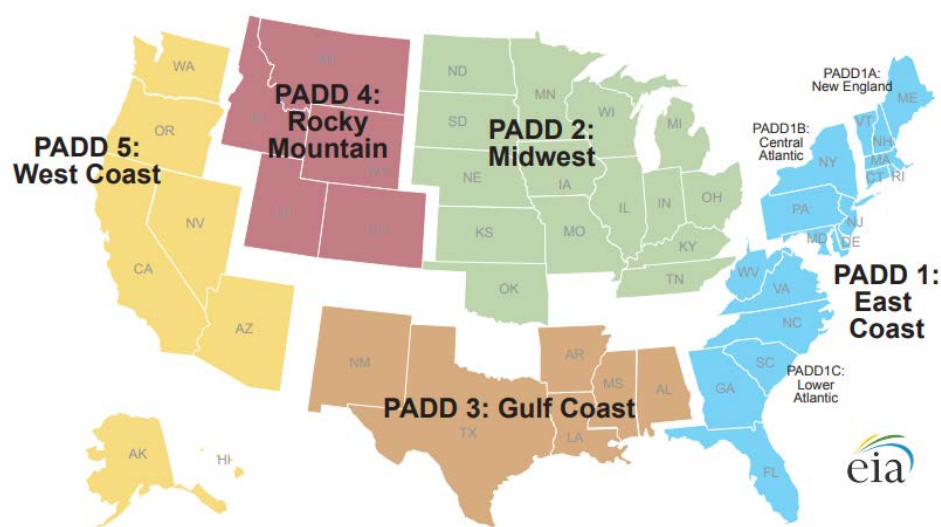


petróleo importados en el país provienen de Estados Unidos, se utilizan las emisiones generadas de esta zona.



**Figura 7.** Porcentaje de distribución por barriles importados según el origen de los productos del petróleo basado en datos de RECOPE (2018b)

Asimismo, Estados Unidos se divide en cinco Distritos de Administración del Petróleo para la Defensa (PADD, por sus siglas en inglés), según se muestra en la Figura 8. Esta separación es útil para analizar patrones en el movimiento del petróleo y sus subproductos según su locación geográfica. La sección denominada PADD 1 se refiere a la Costa Este, el PADD 2 al Medio Oeste, el PADD 3 la Costa del Golfo, el PADD 4 a las Montañas Rocosas y el PADD 5 a la Costa Oeste (Energy Information Administration, 2012).



**Figura 8.** División geográfica de los cinco Distritos de Administración del Petróleo para la Defensa (Energy Information Administration, 2012)

Con respecto a la exportación de asfalto, la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) registra la cantidad de barriles anuales enviados a cada país (Energy Information Administration, 2019). Para Costa Rica se especifica la cantidad de asfalto AC-30 exportada y el total de productos derivados del petróleo exportados según cada zona PADD mostrado en el Cuadro IV.

**Cuadro IV.** Cantidad de productos derivados del petróleo exportado de Estados Unidos a Costa Rica según cada zona (Energy Information Administration, 2019)

Zona	Cantidad de asfalto, barriles	Porcentaje,%	Cantidad de productos del petróleo, barriles	Porcentaje,%
PAAD 1	1 000	0,2	36 000	0,17
PAAD 2	0	0	5 000	0,02
PAAD 3	651 000	99,8	21 071 000	99,77
PAAD 4	0	0	0	0
PAAD 5	0	0	7 000	0,03

De acuerdo con el Cuadro IV, el 99,8% del asfalto exportado por Estados Unidos a Costa Rica proviene de la zona PADD 3, por lo que se toma esta zona para realizar los cálculos de la huella de carbono. De la misma forma se asume esta zona para el resto de los productos

derivados del petróleo involucrados dentro del ACV, como diésel y gasóleo. Los factores de emisión relacionados a combustibles se tomaron del reporte de los “Factores de emisión de gases de efecto invernadero” emitido por el Instituto Meteorológico Nacional, publicado anualmente (Instituto Meteorológico Nacional, 2019).

### **3.2.2. Transporte marítimo del asfalto**

Por medio del análisis anterior se determinó que los derivados del petróleo, y específicamente el asfalto estudiado dentro del ACV proviene de Estados Unidos, PADD 3. El transporte de este material desde otros países se realiza por medio de transporte marítimo, donde RECOPE utiliza mecanismos de contratación para importarlo (RECOPE, 2019a). Debido a regulaciones de la empresa, no se reveló el nombre de la empresa encargada del transporte del asfalto desde Estados Unidos hasta Costa Rica, solicitado en el cuestionario de Apéndices, sección A.2.

No obstante, para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono relacionadas a esta actividad se analizó el puerto donde se reciben las embarcaciones, el tipo de embarcación que transporta el material, la capacidad de las mismas, y el consumo de combustible de acuerdo a la distancia transcurrida.

El asfalto importado a Costa Rica llega al puesto petrolero 5-1 en Puerto Moín, el cual tiene un tamaño máximo de embarcaciones de 60 000 TPM (tonelaje de peso muerto), además de ciertas especificaciones dimensionales (RECOPE, 2019a; RECOPE, 2019b).

El tipo de embarcaciones para transportar asfalto más común en la zona del Caribe y América Latina son conocidos como Panamax y Post-Panamax, los cuales tienen capacidades entre los 55 000 TPM a 80 000 TPM (Vallejo, 2016). Los buques Panamax cumplen con los rangos aceptados para el muelle de Moín, por lo que se seleccionó este

tipo de embarcación para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono atribuidas al transporte de asfalto de Estados Unidos a Costa Rica.

Los datos recolectados pertenecen a un buque asfaltero Panamax construido en Sur Corea, en donde las emisiones generadas se deben a la construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de la embarcación. Se tomaron en cuenta las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso para una cuantificación más detallada. Las emisiones registradas se proporcionan en términos de la capacidad de asfalto de la embarcación y la duración del viaje (Ventikos, Chatzinikolaou, Bilgili, & Celebi, 2016). De esta manera, aunque no se pudo obtener la información de una fuente primaria (cuestionario), fue posible recolectar los datos de una fuente secundaria como la de Ventikos (2016).

### **3.2.3. Almacenamiento del asfalto sin modificar**

Cuando el material llega al país es almacenado en el plantel de RECOPE localizado en Moín. Debido a las propiedades del asfalto, este debe mantenerse a altas temperaturas. En la planta se cuenta con 6 tanques para dicha actividad, con capacidades entre los 1,5 m<sup>3</sup> a los 2,5 m<sup>3</sup>. Los tanques de menor capacidad almacenan el asfalto un tiempo promedio de 4 días, mientras que los de mayor capacidad por 7 días. Las temperaturas de almacenaje se encuentran entre 120 °C y 140 °C. Estos 6 tanques presentan sistemas de calefacción que funcionan con vapor de agua generado por una caldera, la cual utiliza un promedio de 25 m<sup>3</sup> de búnker al día. Esta caldera solamente se utiliza para abastecer con vapor de agua estos tanques debido a la gran cantidad de asfalto que almacenan. La información descrita anteriormente se obtuvo por medio del cuestionario detallado en Apéndices sección A.2 vía telefónica y electrónica.

Cuando el asfalto proveniente de Moín se encuentra en la planta de producción de mezcla asfáltica, se almacena a una temperatura alrededor de 160 °C para ser utilizado lo más rápido posible en la mezcla. Este tanque de almacenamiento funciona por medio de diésel

con un consumo de 0,0018 L de combustible por cada kilogramo de asfalto que contenga. La información se recopiló a través del cuestionario especificado en Apéndices sección A.5 vía presencial y electrónica. Estas actividades permiten que el material se encuentre en buen estado para ser utilizado posteriormente en la producción de la mezcla asfáltica.

#### **3.2.4. Extracción y producción de agregados**

Aparte del ligante asfáltico, los agregados son utilizados en la construcción de pavimentos. La materia prima se extrae del río con una excavadora Cat 349 y se usan tres vagonetas Cat 725 para el transporte a la planta de producción de agregados, localizada en la zona de Guápiles. El material recolectado se tritura por primera vez y se tamiza para separar la piedra bruta. Seguidamente, el material restante se hace pasar por una trituradora de cono en dos etapas y se tamiza de nuevo para separar la cuartilla, quintilla, polvo de piedra y material de retorno.

Las actividades relacionadas a la extracción y el transporte utilizan diésel como fuente de energía, mientras que la producción se realiza con electricidad proporcionada por el Sistema Nacional Eléctrico. La información relativa al procesamiento de agregados se obtuvo por medio del cuestionario descrito en Apéndices sección A.3 vía telefónica y electrónica. De esta manera se obtienen las entradas relacionadas a la producción de agregados, que como se ha mencionado, corresponden al mayor porcentaje de material dentro de una mezcla asfáltica (Araya, 2010).

#### **3.2.5. Reprocesamiento de polímeros reciclados**

En el caso de los pavimentos verdes, aparte del asfalto y los agregados, se incluye un material adicional como el PET reciclado en la presente investigación. El polímero reciclado proviene del Gran Área Metropolitana de Costa Rica, el cual se recolecta y es llevado a la planta para su reprocesamiento. En este caso específico se utilizaron botellas recicladas de PET, por lo que requieren un reprocesamiento para disminuir su tamaño y poder aplicarlo

en el producto final. La información de este proceso se obtuvo por medio del cuestionario de Apéndices, sección A.4.

Debido a que este material requiere cumplir con ciertos requerimientos de tamaño y cantidad de masa, el LanammeUCR realizó estudios para determinar las cantidades necesarias de materia prima para producir la mezcla asfáltica. Se determinó que el PET reciclado debe pasar por la malla No.4, es decir, poseer dimensiones menores a 4,75 mm (Monturiol, 2019).

Según el tipo de material reciclado que se utilice, así se debe realizar el reprocesamiento del mismo. Para esta fase solamente aplica la trituración de las botellas, la cual se realizó con un molino marca Taskmaster, modelo TM-8512 (Rojas G. A., 2020) en la planta de reprocesamiento de material reciclado, la cual opera con electricidad generada por medio de paneles solares. El molino descrito anteriormente posee una capacidad de 250 kg/h y su motor una potencia de 3,7 kW (Franklin Miller Inc, s.f.). Los datos mencionados anteriormente se recolectaron por medio del cuestionario especificado en Apéndices sección A.4 por vía electrónica y telefónica. Estos datos son fundamentales para el cálculo del consumo eléctrico y, por ende, las emisiones atribuidas a esta operación.

### **3.2.6. Transporte de materiales**

Posterior a la manufactura de la materia prima, el transporte es requerido en varias etapas del ciclo de vida de las mezclas asfálticas, en donde se analiza el traslado de materia prima a la planta productora y seguidamente de la mezcla al sitio de construcción. Se determinó para cada material la distancia transportada, el tipo y la cantidad de combustible utilizado según cada vehículo y masa transportada. La información relacionada al transporte de la materia prima se obtuvo de los cuestionarios descritos en Apéndices, secciones A.5 y A.6, y para el transporte de la mezcla se utilizó el cuestionario de la sección A.7, de los cuales se obtuvo la respuesta de manera presencial, también vía electrónica o telefónica. Esta

información es fundamental ya que se cuantifican las emisiones tomando en cuenta las distancias recorridas dentro del país.

### **3.2.7. Generación de electricidad**

Dentro de la producción, la energía necesaria para que los equipos trabajen se puede obtener a partir de combustibles o de electricidad proporcionada por parte del Sistema Nacional Eléctrico. La generación de electricidad varía según cada país y las fuentes de energía utilizadas. En Costa Rica, más del 98% de la producción eléctrica se genera a partir de fuentes renovables desde el 2015. La mayoría de esta energía se genera con recursos hídricos, siendo las plantas Dengo, Reventazón y Arenal, Angostura, Cachí y Miravalles II las más importantes a nivel nacional. Igualmente, aparte de la energía hidroeléctrica, para la producción de energía también se utilizan fuentes de energía eólica, geotérmica, solar y de biomasa. En Costa Rica se localizan 18 plantas eólicas administradas por empresas públicas y privadas. Se cuenta con el tercer parque geotérmico más grande del continente, propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019).

Esta situación provoca que las emisiones de GEI asociadas a la matriz eléctrica sean mucho más bajas comparadas a otros países. Los factores de emisión relacionados a la generación de electricidad se tomaron del reporte de los “Factores de emisión de gases de efecto invernadero” emitido por el Instituto Meteorológico Nacional, el cual se publica anualmente (Instituto Meteorológico Nacional, 2019). Dichos datos son aplicados dentro de la producción de materia prima o mezcla asfáltica para equipos eléctricos que no utilicen energía generada por combustible.

### **3.2.8. Planta de modificación de asfalto**

En la etapa de producción, se lleva a cabo la modificación de asfalto con Elvaloy y PPA. El proceso se realiza por medio de vía húmeda, lo que quiere decir que los polímeros se

agregan al asfalto. En la industria, se suele modificar primero el asfalto y luego proceder comúnmente con la producción de la mezcla asfáltica (Ramírez, Ladino, & Rosas, 2014).

Para aplicar la modificación al caso en estudio se buscaron varios tipos de plantas en el mercado que pudieran trabajar con los polímeros mencionados anteriormente. El sistema de producción de mezcla asfáltica por medio de la planta Prime 140 de Ammann, utilizado para producir la mezcla asfáltica con asfalto original y asfalto modificado con PET reciclado, también puede acoplarse a los equipos donde se produce el asfalto modificado con polímeros convencionales (Ammann, 2014). El tipo de planta fue proporcionado por parte del encargado de la planta de producción de mezcla asfáltica de manera presencial.

En relación con el consumo energético, se requiere el mismo consumo de gasóleo para el quemador, al igual que el diésel empleado en la producción de mezcla asfáltica, solamente se añade el gasto de combustible debido a la producción de asfalto modificado. La diferencia con respecto al escenario 1 y 2, es que el asfalto original almacenado se coloca a la entrada de los equipos adicionales en donde se lleva a cabo la modificación del ligante asfáltico, el cual posteriormente se dirige a la entrada de la planta de mezcla asfáltica (Ammann, 2014).

La planta de mezcla asfáltica posee una capacidad de 90 ton/h a 100 ton/h (Ammann, 2014), por lo que la planta para modificación del bitumen debe suplir la cantidad requerida. De esta forma, es posible utilizar una planta de la marca ADM para modificar asfalto, la cual consume de 5,5 a 7 litros de diésel por tonelada de asfalto modificado que se requiera producir (Saez, 2011). Otra opción que cumple con las capacidades de producción establecidas es la planta de asfalto móvil de AIMIX, presentando un consumo de combustible de 5,9 a 8,9 litros de diésel por tonelada de asfalto modificado producido (AIMIX GROUP, 2020).



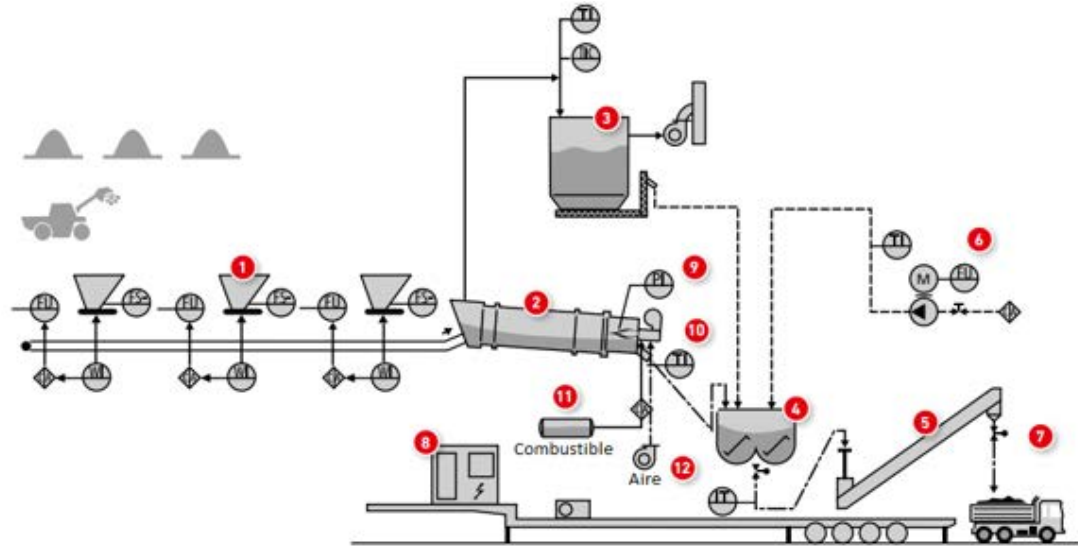
Asimismo, se ha estudiado el consumo de combustible según las temperaturas de fabricación de la mezcla asfáltica. En el caso de mezclas asfálticas en caliente, se estima que el consumo de combustible ronda entre los 5,8 L a 7 L por cada tonelada de asfalto modificado producido (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). El promedio de consumo corresponde a 6,68 L por tonelada de asfalto modificado.

No obstante, otra opción que se utiliza a nivel industrial cuando las cantidades de asfalto modificado no son tan grandes, son las plantas eléctricas para agregar los polímeros al ligante. Con el objetivo de comparar los dos tipos de producción, se buscó una planta eléctrica de la marca GlobeCore, modelo UVB-2, como complemento a la planta de producción de mezcla asfáltica Prime 140 de Ammann. La planta UVB-2 posee una capacidad de 4 m<sup>3</sup>/h, con una potencia nominal de 193,55 kW (GlobeCore, 2020). Para producir la cantidad deseada de asfalto modificado requerido en una tonelada de mezcla asfáltica se necesitaría 0,015 h, lo cual implica un consumo energético de 2,90 kWh (corresponde a 0,048 kWh por kilogramo de asfalto modificado).

Por medio de estas adiciones a la planta principal es posible realizar la modificación del asfalto con Elvaloy y PPA como un primer paso en la producción de la mezcla asfáltica.

### **3.2.9. Producción de la mezcla asfáltica**

La mezcla asfáltica se produce en la planta asfáltica continua móvil PRIME 140 Ammann a 162 °C en la planta localizada en El Coyol de Alajuela, información proporcionada de manera presencial por parte del encargado en esta organización. Esta planta incorpora todos los equipos necesarios en la producción de mezcla asfáltica; permite añadir material reciclado, incorporar equipos al proceso, regular el volumen de carga y el rendimiento. Se adjunta en la Figura 9 un detalle del proceso llevado a cabo en la planta (Ammann, 2014).



#### Leyenda

1. Dosificación con dos células de carga individuales
2. Tambor-secador con quemador Ammann
3. Filtro a mangas AFA, Ammann
4. Mezclador Amix, Ammann
5. Elevador de cadena con placa rascadora, y silo de descarga
6. Conexión para alimentación de betón aislada, y calentada eléctricamente
7. Descarga al camion
8. Cabina de control con sistema de control Ammann, as1Push
9. Medición de la presión con indicador
10. Medición de la temperatura con regulador e indicador
11. Combustible
12. Sistema neumático

**Figura 9.** Diagrama de las operaciones involucradas en la planta de mezcla asfáltica PRIME 140 (Ammann, 2014)

Los componentes de la planta se especifican seguidamente (Ammann, 2014):

- a) Equipo de pre-dosificación: Silos dosificadores de agregados

Incluye tres dosificadores con báscula para los agregados (u otros sólidos), con una capacidad de 7 m<sup>3</sup> cada uno.

- b) Cintas transportadoras/dosificadoras planas para evitar caída de material.

Se encargan de transportar los agregados al secador.

- c) Tambor – secador

Se utiliza para secar los agregados. Posee un área de secado de 6 m, con un movimiento constante de cascada para el material y aislamiento térmico.

d) Quemadores

Garantizan un ahorro máximo de combustible y bajas emisiones. Los quemadores se utilizan en el proceso de secado y calentamiento. Este equipo se encuentra disponible para utilizarlo con cualquier tipo de mezcla de combustible, ya sea diésel, gas natural, gas líquido o combinados.

e) Cabina de mando

Se pueden controlar las funciones y operación de la planta en general.

f) Sistema de filtración: Filtro de mangas

El sistema integra un separador de agregado para la reducción del ensuciamiento del filtro de mangas. El filtro de mangas posee un sistema a contracorriente, con un área de filtrado de 330 m<sup>2</sup> y bajo nivel de ensuciamiento, aumentando el nivel de vida de las mangas. El filtro de aire protege el equipo contra el polvo.

g) Mezclador de doble eje tipo *Pug-mill*

Su capacidad es de 35 – 140 ton/h. Se asegura una mezcla homogénea al mezclar fuera del tambor secador. Es posible agregar el material reciclado directamente en esta parte del proceso.

h) Elevador de la mezcla asfáltica

Cuando la mezcla asfáltica se encuentra homogénea, es transportada por medio de un elevador con paletas cerradas y una capacidad de 140 ton/h, hacia el camión.

La información relacionada a la producción de la mezcla asfáltica se obtuvo por medio de los cuestionarios detallados en Apéndices, secciones A.1 y A.6, contestado en su mayoría de manera presencial y dudas posteriores aclaradas por vía electrónica. De esta forma, el producto en estudio se produce en este punto, pero el ciclo de vida no finaliza en esta fase.

### **3.2.10. Construcción de los tramos**

Al tener preparada la mezcla asfáltica, el material se debe colocar para construir tramos de carretera y pueda ser utilizada posteriormente por los usuarios finales. La construcción de los tramos se llevó a cabo el 20 de setiembre del 2019 en el Laboratorio de Pavimentos a Escala Natural del LanammeUCR por parte de la empresa productora de mezcla asfáltica y con supervisión del personal del LanammeUCR. El detalle del equipo utilizado se obtuvo con ayuda del cuestionario mostrado en los Apéndices, sección A.7, el cual se completó una parte de manera presencial y otra vía electrónica. El tiempo de operación para cada equipo se tomó presencialmente en el momento de la construcción.

Se calculó un tiempo de 35 min relacionado al uso de la pavimentadora y de 15 min para el rodillo doble. Para calcular el combustible de estos equipos se requirió información del motor de cada uno. La pavimentadora utilizada es marca AMMANN y modelo AFT 400-2, las cuales utilizan un motor Deutz 2.9L TD de 4 cilindros (AMMANN, 2020). Este tipo de motor opera con una potencia de 55,4 kW y tiene un consumo de combustible específico igual a 225 g/kWh (DEUTZ, 2019). Además, este tipo de motores utilizan diésel como combustible (AMMANN, 2020).

Con respecto a la compactadora de doble rodillo se sigue el mismo procedimiento. Igual que la compactadora, es de la marca AMMANN y modelo AV 110 X TIER 3. El motor que utilizan este tipo de compactadoras es el Cummins QSB3.3 99 (AMMANN, 2020), el cual se caracteriza por consumir 3,3 L de combustible por hora, y también funciona con diésel (Cummins, 2020).

De acuerdo con el alcance seleccionado para este ACV, de la cuna a la tierra, la construcción de los tramos corresponde a la última etapa que se incluye en el análisis.

### **3.3. Asignación de emisiones en los procesos requeridos**

Con respecto a la asignación de emisiones, se debe aplicar primeramente a los productos derivados del petróleo, ya que poseen crudo de petróleo como materia prima en común. De esta manera, se asignan las emisiones de GEI proporcionalmente a cada co-producto, aplicando alguna proporción física o valor económico.

En el presente estudio, los factores de emisión para el asfalto de acuerdo con la zona de producción en Estados Unidos se tomaron de la investigación de Young, Morelli y Hawkins (2017), los cuales incluyen un método de asignación de emisiones, razón por la cual no es necesario realizar estos los cálculos ya que están incluidos. Esos autores utilizan un método de asignación basado en el Modelo de Inventario de Ciclo de Vida de una Refinería de Petróleo (PRELIM, por sus siglas en inglés), donde se selecciona el uso de energía para cada unidad de subproceso de cada refinería según la locación (Young, Morelli, & Hawkins, 2017). De esta manera, se obtienen los factores de emisión para el asfalto de la misma locación geográfica donde se exporta el ligantes utilizado en la producción de mezclas asfálticas en estudio.

Una gran cantidad de polímeros se derivan de sustancias químicas procedentes del petróleo, por dicha razón también se debe aplicar la asignación de emisiones. El método de asignación en el punto de sustitución (APOS) de Ecoinvent descrito en la sección 1.7.3, se selección ya que describe de una manera más apropiada el sistema. Se está trabajando con materiales de desecho y reciclados, por lo que la selección de este modelo en la recopilación de datos es el más recomendado, ya que toma en cuenta la influencia de subproductos y co-productos involucrados en el proceso.

La huella de carbono relativa al caucho sintético, al Elvaloy, al PEAD y al PET reciclado se tomó de Ecoinvent 3. Lo mismo ocurre con el SBR, por lo que no es necesario realizar los cálculos de asignación de emisiones, ya que los investigadores cuantificaron las emisiones

por medio de esta misma base de datos (Soratana, Rasutis, Azarabadi, Eranki, & Landis, 2017). El SBR y al SBS poseen como materia prima estireno y butadieno, los cuales son derivados del petróleo, por lo que se incluyen dentro de la asignación de emisiones. El valor de las emisiones generadas por la producción de SBS se tomó de investigaciones previas donde utilizaron la base de datos del software GaBi, el cual utiliza una asignación por contenido energético y másico, así que la corrección se encuentra implícita en el dato utilizado (Wildnauer, Mulholland, & Liddie, 2019).

El método de asignación de emisiones se debe aplicar a la producción de agregados debido a que provienen de una misma materia prima pétreo. Sin embargo, para este caso particular no es necesario aplicarlo debido a que los datos proporcionados por el quebrador están separados, relacionados al consumo energético o de combustible para el transporte y producción de quintilla y polvo de piedra.

### **3.4. Datos del inventario para el caso de estudio**

El inventario de GEI detalla la cantidad de materiales, combustible, electricidad, distancia recorrida atribuidas a las fuentes identificadas en la sección 3.1 relacionadas a los datos primarios, ya que los datos secundarios se obtuvieron por medio de bases de datos o investigaciones previas según se especificó en la sección Desarrollo del inventario de ciclo de vida. En el Cuadro V se muestra la masa requerida de cada material para producir 1 tonelada de mezcla asfáltica según el diseño de mezcla (véase Apéndice C.1, C.2 y C.3).

En general, se utilizó una mayor cantidad de asfalto en el escenario 1, mientras que la mayor cantidad de agregados se mostró tanto para el escenario 1 como el escenario 3, con la misma masa. El escenario 2 y el escenario 3 presentan diferentes polímeros modificadores, los cuales varían la proporción de materiales dentro de la mezcla asfáltica comparada con el escenario 1. Dicho análisis se realiza profundamente en el Capítulo 4.

**Cuadro V.** Diseño de mezcla para producir 1 tonelada de mezcla asfáltica según cada escenario

<b>Material</b>	<b>Masa de cada material /(kg)</b>		
	<b>Escenario 1 Asfalto Convencional</b>	<b>Escenario 2 Asfalto Verde</b>	<b>Escenario 3 Asfalto modificado</b>
Asfalto	61,0	60,4	60,2
Agregados	939,0	930,3	939,0
PET	0,0	9,3	0,0
Elvaloy	0,0	0,0	0,72
PPA	0,0	0,0	0,12
<b>Mezcla asfáltica (total)</b>	<b>1000,0</b>	<b>1000,0</b>	<b>1000,0</b>

El inventario se va a presentar en dos grandes secciones, la primera sección en el Cuadro VI relacionada a cada actividad de procesamiento por material. Posteriormente, se detalló en el Cuadro VII el inventario relacionado al área de transporte de todos los materiales involucrados. La recolección de esta información se detalla previamente en la sección 3.2 y los cálculos relacionados se especifican en Apéndices sección C.6.

**Cuadro VI.** Datos del inventario del ciclo de vida del caso de estudio relacionados a las actividades de procesamiento



Material	Actividad de procesamiento	Fuente de energía	Consumo /(\$/ton de material)	Masa de material /( $kg_{total}$ )	Combustible o electricidad por masa total /( $L$ o $kWh/kg_{total}$ )	Combustible o electricidad por kg de material /( $L$ o $kWh/kg_{mat}$ )
Asfalto	Almacenamiento en planta RECOPE	Búnker	N.A.	322 694	25 000	0,0775
	Almacenamiento en planta de mezcla	Diésel	N.A.	N.A.	N.A.	0,00180
Agregados (Polvo de piedra)	Extracción	Diésel	439	1000	0,795	0,00080
	Producción (Molienda y tamizado)	Electricidad	360	1000	2,880	0,00288
Agregados (Quintilla)	Extracción	Diésel	502	1000	0,909	0,00091
	Producción (Molienda y tamizado)	Electricidad	411	1000	3,289	0,00329
PET reciclado	Re-proceso (Molienda)	Electricidad	N.A.	1000	55,50	0,0555
Asfalto Modificado en Planta Eléctrica	Producción	Electricidad	N.A.	61,0	2,903	0,0476
Asfalto Modificado en Planta de Combustible	Producción	Diésel	N.A.	61,0	0,408	0,00668
Mezcla asfáltica	Quemador	Gasóleo	N.A.	1000	6,750	0,00675
	Producción en planta de mezcla	Diésel	N.A.	1000	2,000	0,0020
	Construcción de los tramos	Diésel	N.A.	1000	0,794	0,000794



**Cuadro VII.** Datos del inventario del ciclo de vida relacionados al transporte de materiales

<b>Material</b>	<b>Trayecto</b>	<b>Tipo de combustible</b>	<b>Distancia transportada /(km)</b>	<b>Masa de material /(kg<sub>total</sub>)</b>	<b>Combustible por masa total /(L/kg<sub>total</sub>)</b>	<b>Combustible por kg de material /(L/kg<sub>mat</sub>)</b>
Asfalto	Puerto en Moín a planta de RECOPE en Moín	Diésel	3,5	23000	1,865	0,00008
	Planta de RECOPE en Moín a planta de mezcla asfáltica	Diésel	347	23000	185	0,00804
Agregados (Polvo de piedra)	Río a Quebrador	Diésel	1,5	1000	0,54	0,00054
	Quebrador a planta de mezcla asfáltica	Diésel	80	1000	28,8	0,02880
Agregados (Quintilla)	Río a Quebrador	Diésel	1,5	1000	0,54	0,00054
	Quebrador a planta de mezcla asfáltica	Diésel	80	1000	28,8	0,02880
PET reciclado	Desechos municipales a planta de mezcla asfáltica	Diésel	14	16000	2,95	0,00018
	Reprocesadora de polímero reciclado a planta de mezcla asfáltica	Diésel	13	16000	2,74	0,00017
Elvaloy + PPA	Suplidor de polímeros a planta de mezcla asfáltica	Diésel	60	16000	12,646	0,00079
Mezcla asfáltica	Planta de mezcla asfáltica al LanammeUCR	Diésel	25,4	12135	14,09	0,00116

Adicional a los datos anteriores, se calculó la distancia y tiempo de transporte del asfalto producido en PADD 3 hasta puerto Moín en Costa Rica por medio de una herramienta desarrollada por *Sea-Distances* (2019). Se seleccionó un buque asfaltero Panamax según las especificaciones descritas en la sección 3.2.2, donde además se determina una velocidad de 10 nudos para este tipo de embarcaciones (Ventikos, Chatzinikolaou, Bilgili, & Celebi, 2016). Asimismo, se determinó el puerto de donde departe el asfalto dentro del PADD 3 hacia Costa Rica (RECOPE, 2019b) y resultó en un tiempo de traslado de 5 días y 11 horas (131 horas) según se muestra en la Figura 10. Por medio de esta información resultante y al relacionarla con factores de emisión relacionados a este tipo de embarcaciones, es posible calcular el combustible que utilizaría y los GEI que emitiría (Ventikos, Chatzinikolaou, Bilgili, & Celebi, 2016).

<p><b>Port of Departure</b></p> <p>Country</p> <p> United States</p> <p>Port</p> <p>Gulfport</p> <p>Vessel speed, knots:</p> <p>10</p>	<p><b>Port of Arrival</b></p> <p>Country</p> <p> Costa Rica</p> <p>Port</p> <p>Puerto Moín</p> <p style="text-align: center;"><b>Calculate</b></p>	<p><b>Result</b></p> <p><b>Direct way</b></p> <table border="1"> <tr> <td><b>Distance</b></td> <td>1312 nautical miles</td> </tr> <tr> <td><b>Vessel speed</b></td> <td>10 knots</td> </tr> <tr> <td><b>time</b></td> <td>5 days 11 hours</td> </tr> </table>	<b>Distance</b>	1312 nautical miles	<b>Vessel speed</b>	10 knots	<b>time</b>	5 days 11 hours
<b>Distance</b>	1312 nautical miles							
<b>Vessel speed</b>	10 knots							
<b>time</b>	5 days 11 hours							

**Figura 10.** Estimación de la distancia y tiempo para el transporte marítimo del asfalto desde Estados Unidos hasta Costa Rica (Captura de pantalla de: *Sea Distances and Ports Distances*, 2019)

### 3.5. Modelamiento de los datos del inventario

El modelamiento de los datos primarios y secundarios se realizó por medio de la herramienta creada para este estudio utilizando una hoja de cálculo en Excel. La herramienta se centra en la cuantificación de la huella de carbono para diferentes tipos de mezclas asfálticas. La metodología de los cálculos se basa en la ISO 14040:2006 y la ISO 14067:2018.

La huella de carbono para cada etapa y la total se registran en términos de la unidad funcional tonelada de mezcla asfáltica. Sin embargo, la herramienta permite el cálculo de

la huella de carbono total en términos de otras unidades funcionales como kilómetro de carretera por carril y milla de carretera por carril.

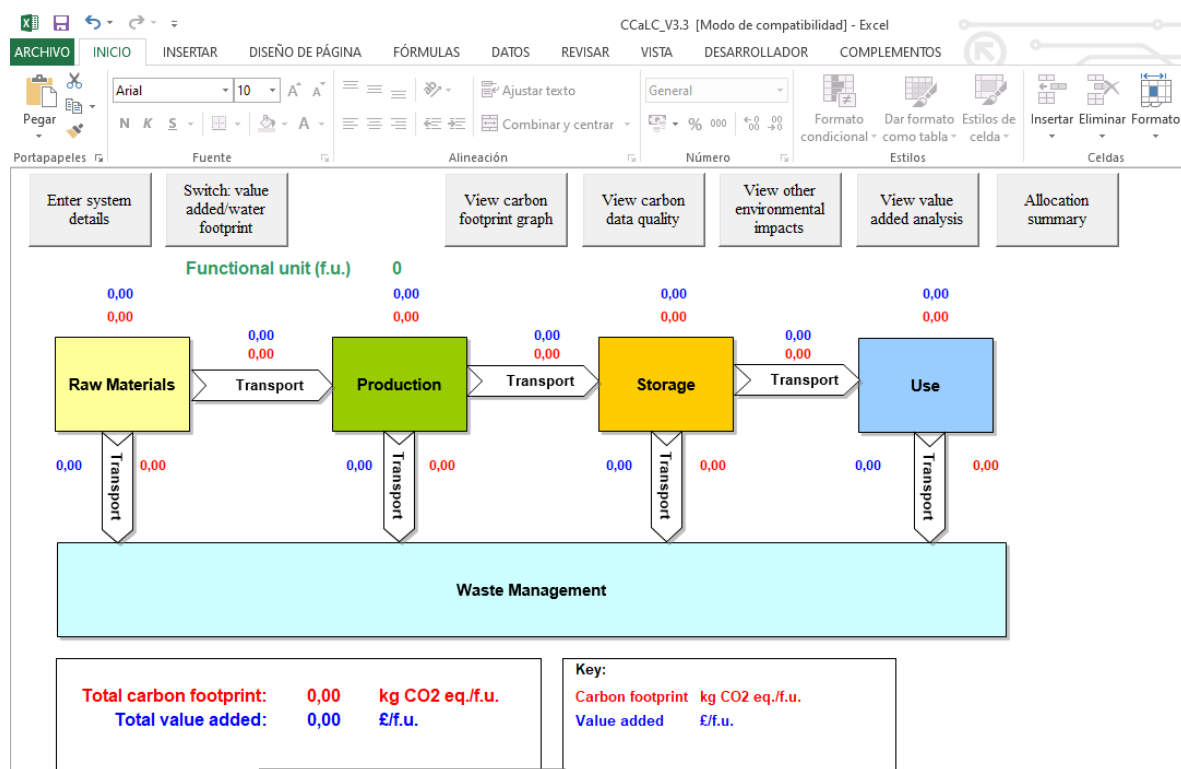
### **3.5.1. Desarrollo de la herramienta para cuantificar la huella de carbono**

El desarrollo de la herramienta es de gran importancia dentro del ACV, por medio de ella se obtienen los resultados que van a ser analizados posteriormente. Además de ser utilizados en la presente investigación, la herramienta puede ser utilizada dentro del LanammeUCR con fines investigativos.

Primeramente, se escogió Excel como el programa para desarrollar la herramienta ya que es sencillo ingresar cálculos y programar Macros, brinda una interfaz conocida para cualquier usuario que desee utilizar la herramienta, es fácil de editar en caso que un usuario desee cambiar o agregar alguna sección, y el objetivo del estudio no es desarrollar una herramienta, sino evaluar los diferentes tipos de asfalto. Aunque en el mercado se encuentran disponibles varias herramientas para aplicar en ACV, esta herramienta se enfoca en la producción de mezclas asfálticas, con una base de datos localizada en la zona geográfica de Costa Rica.

Se estudió la manera en que funcionan, las secciones que incluyen y los cálculos que se realizan en las herramientas SimaPro y Open LCA. En el caso de SimaPro, presenta cómo preparar la entrada de datos, las etapas que se pueden analizar dentro de un ACV, las opciones para unidades funcionales, los posibles impactos ambientales que analiza, los métodos de asignación de emisiones, la conexión con las bases de datos e incluye una sección para analizar los resultados (Goedkoop, et al., 2016). Por otra parte, Open LCA incluye las mismas observaciones que SimaPro, solamente que una interfaz distinta. Además, ejemplifica los flujos de proceso, cómo agregar entradas y salidas al sistema de estudio, la manera en que se puede exportar e importar información y la interacción con el usuario (Gómez, Torres, Rincón, & Rodríguez, 2018).

Aparte de las conocidas herramientas anteriores, se procedió a revisar herramientas con una interfaz desarrollada en Excel. Una de estas es la herramienta británica CCaLC2, la cual presenta un flujo del proceso en donde se ingresan los datos etapa por etapa para la cuantificación de la huella de carbono. En la misma pantalla principal se observan los resultados en términos de las emisiones y el valor económico de cada etapa. La Figura 11 muestra la pantalla principal donde el usuario ingresa los datos necesarios y al presionar los botones superiores se despliegan listas y opciones adicionales (Azapagic, et al., 2012).

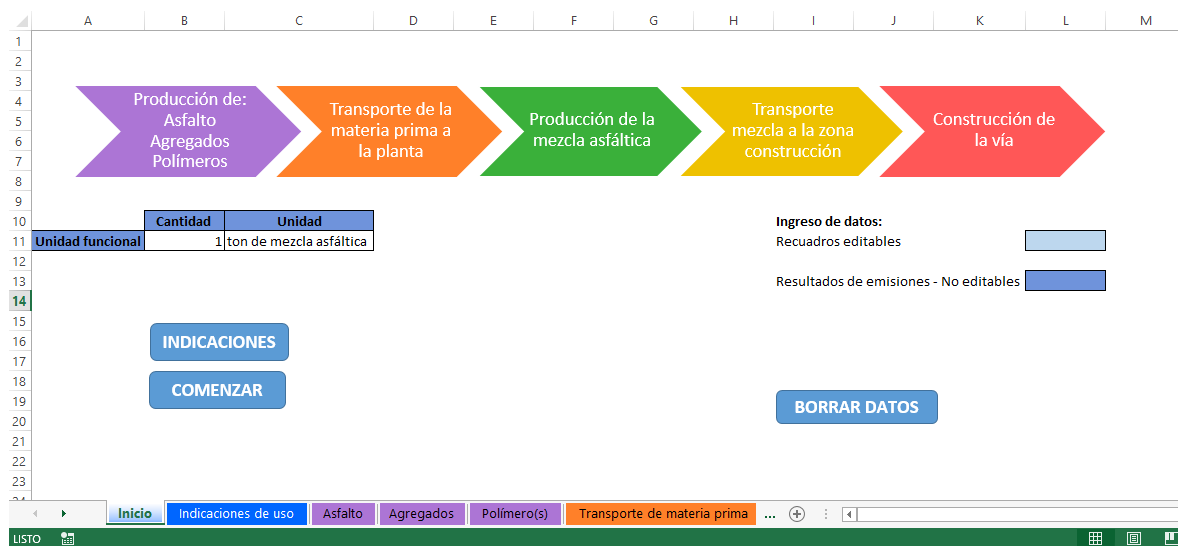


**Figura 11.** Captura de pantalla de la interfaz de la herramienta británica CCaLC versión 3 (Azapagic, et al., 2012)

Otras herramientas similares, desarrolladas en Excel, fueron analizadas como guía para la herramienta de la presente investigación. Una de ellas se llama “Carbon Calculator for Land Use Change from Biofuels Production (CCLUB)” realizada por Dunn et al. (2016) y está enfocada en la huella de carbono relacionada a la producción de biocombustibles. Otra

herramienta de interés es la conocida como “Pollution Prevention Greenhouse Gas Calculator” elaborada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), centrada en el cálculo de la reducción de emisiones de GEI atribuido a la conservación de la electricidad, el uso de fuentes renovables de energía, el uso de biocombustibles, la reducción del uso de agua, entre otros (Ambiental, Agencia de Protección, 2015). Además de esta herramienta, la EPA también confeccionó una calculadora de emisiones de GEI especializada en ayudar a las organizaciones a realizar el inventario de GEI (Agencia de Protección Ambiental, 2014).

Los instrumentos de cálculo anteriores constituyen las principales herramientas en las que se basó para desarrollar la actual, pero no son los únicos. De acuerdo con los ejemplos revisados, se agregó un esquema general de las etapas del ciclo de vida en la pantalla inicial (Figura 12) y las instrucciones de uso en la segunda pantalla. Una descripción más detallada de cada pantalla, las indicaciones de uso, las indicaciones para actualizar la base de datos y otros detalles se encuentra en el Apéndice D.



**Figura 12.** Sección de Inicio de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono de mezclas asfálticas (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

La identificación de fuentes de emisión y la recolección de datos para el inventario de GEI, se realizó simultáneamente con el desarrollo de la herramienta. Por esta razón, se dividió según cada etapa incluida dentro del enfoque de la cuna a la tierra para mezclas asfálticas, correspondiendo a la producción de materia prima, el transporte de la misma a la planta, la producción de la mezcla asfáltica, el transporte de esa mezcla a la zona de construcción y la colocación del material. Dentro de cada una se desglosó por cada actividad u operación unitaria involucrada dentro de la fase.

Con respecto a los cálculos en cada caso, se tomó como guía la ISO 14067:2018 (2018), en conjunto con las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la huella de carbono por medio de Bo et al. (2017) y Li et al. (2019). La ecuación 1 se utilizó en los casos donde se podía tener el dato de cantidad de combustible o los kilowatts consumidos; el detalle de cuándo se utilizó la ecuación en cada etapa del ciclo de vida se especifica en el Apéndice D.

Cuando no se posee la información de consumo de combustible o electricidad, se hace uso de una base de datos; igualmente para obtener los factores de emisión o índices de potencial de calentamiento global. De esta manera, por medio de revisión literaria y datos de Ecoinvent, se desarrolló la base de datos que incluye los factores de emisión relacionados a: la producción de asfalto en Estados Unidos, las emisiones de los busques asfalteros Panamax, los combustibles en Costa Rica, las emisiones anuales de la electricidad generada en Costa Rica, las emisiones de la electricidad generada con energía solar, las emisiones de diferentes polímeros comerciales y, los índices de potencial de calentamiento global.

Para completar la información necesaria se requirió de una exhaustiva revisión bibliográfica, comparando varias referencias para determinar los valores seleccionados. El Apéndice D muestra las fuentes de las que se tomaron los datos para la base de datos, cómo actualizarla y capturas de pantalla para mostrar cómo se observan en la herramienta. En general, se incluyeron listas desplegables, opciones de selección múltiple, accesos rápidos

y botón para eliminar datos con el objetivo de que la herramienta sea más amigable con el usuario y para evitar fuentes de error o confusión al utilizarla.

Al poseer todas las emisiones de GEI de cada etapa, se resumen los resultados al final de cada sección y al final de la herramienta, mostrando el resultado total de la huella de carbono. Al culminar la herramienta, se procedió a realizar el cálculo de la huella de carbono con los datos de asfalto verde para corroborar que las ecuaciones, listas desplegadas, hipervínculos, Macros y demás referencias funcionaran adecuadamente. Se realizaron las correcciones correspondientes, se verificaron los cálculos manualmente y se analizó que los resultados tuvieran sentido físico para así obtener la versión final que fue utilizada en el modelamiento de los datos.

### **3.5.2. Cuantificación de la huella de carbono**

Según la ISO 14040:2006 (2006) es necesario identificar la manera en que se modelan los datos recolectados en el inventario de GEI y el resultado final obtenido. En este caso, se utilizó la herramienta descrita anteriormente para obtener la huella de carbono de los diferentes tipos de asfalto en estudio. Los valores del inventario detallado en la sección 3.4 se deben ingresar en términos de kg de material, por lo que se tomaron los datos de la columna 7 del Cuadro VI y Cuadro VII para la obtención de los resultados finales. Las salidas mostradas por la herramienta para el escenario 1 se muestran en la Figura 13 y la Figura 14, para el escenario 2 en la Figura 15 y la Figura 16, en el escenario 3.1 la Figura 17 y la Figura 18, y para el escenario 3.2 la Figura 19 y la Figura 20.

Asimismo, la norma ISO 14040:2006 (2006) menciona que la interpretación de los resultados se localiza en la última fase del ACV, y al ser una de las secciones más importantes del proyecto, el análisis de los resultados se realiza en el Capítulo 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO</b>							
2	<b>1. Huella de carbono para la mezcla asfáltica</b>							
3								
4	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e	356,31	kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> /ton <sub>mezcla</sub>					
5								
6	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e	0,356	kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> /kg <sub>mezcla</sub>					
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

Asfalto

Agregados

Polímero(s)

Transporte de materia prima

Producción de la mezcla

Transporte de la mezcla

Construcción de la vía

Figura 13. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 1, parte A

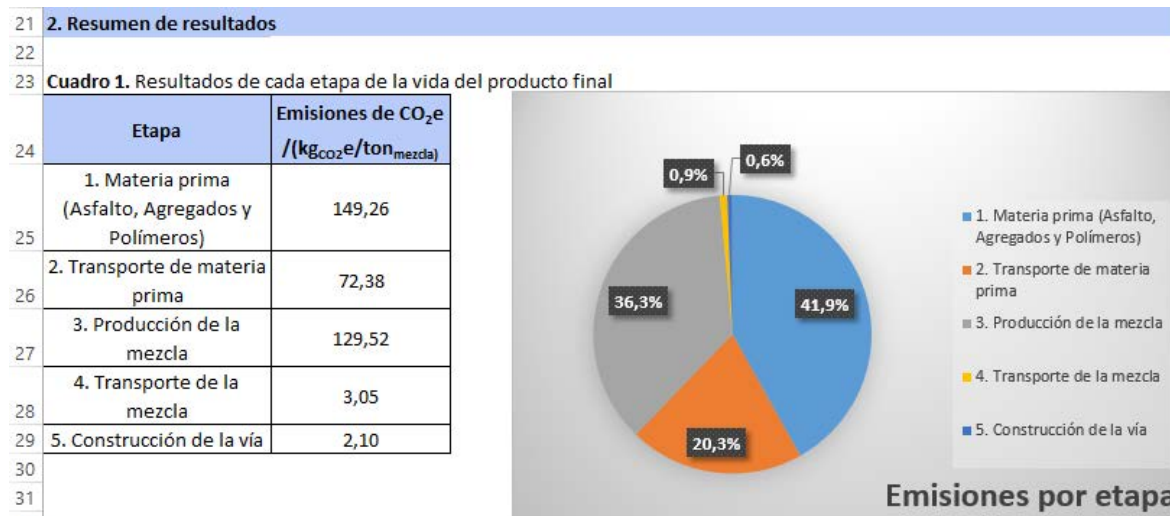


Figura 14. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 1, parte B



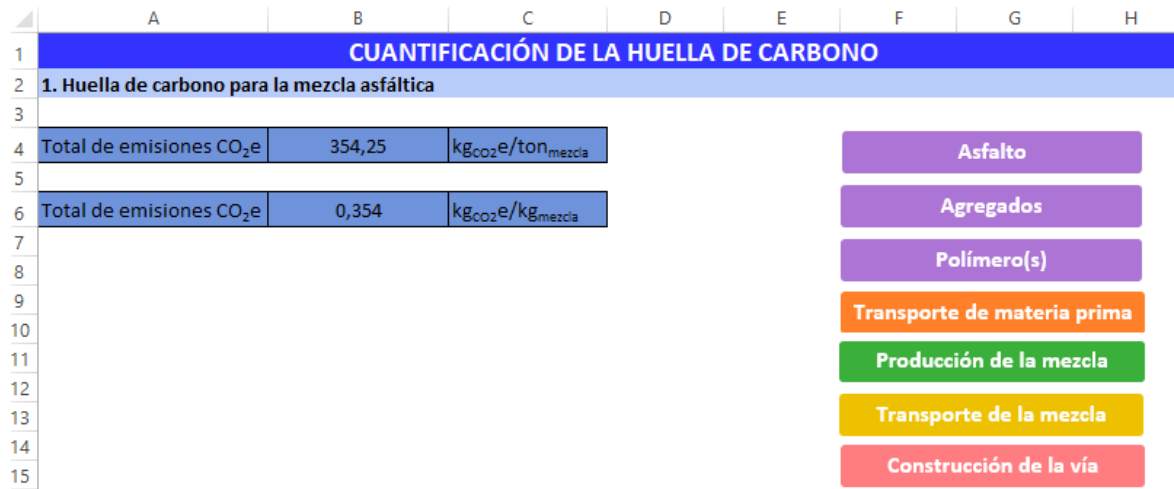


Figura 15. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 2, parte A

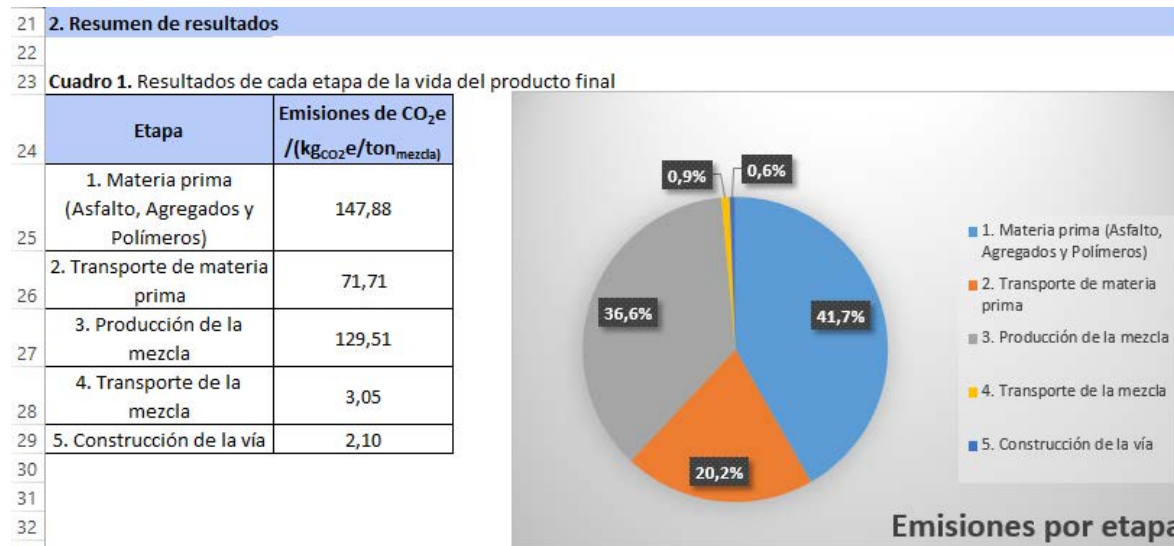


Figura 16. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 2, parte B

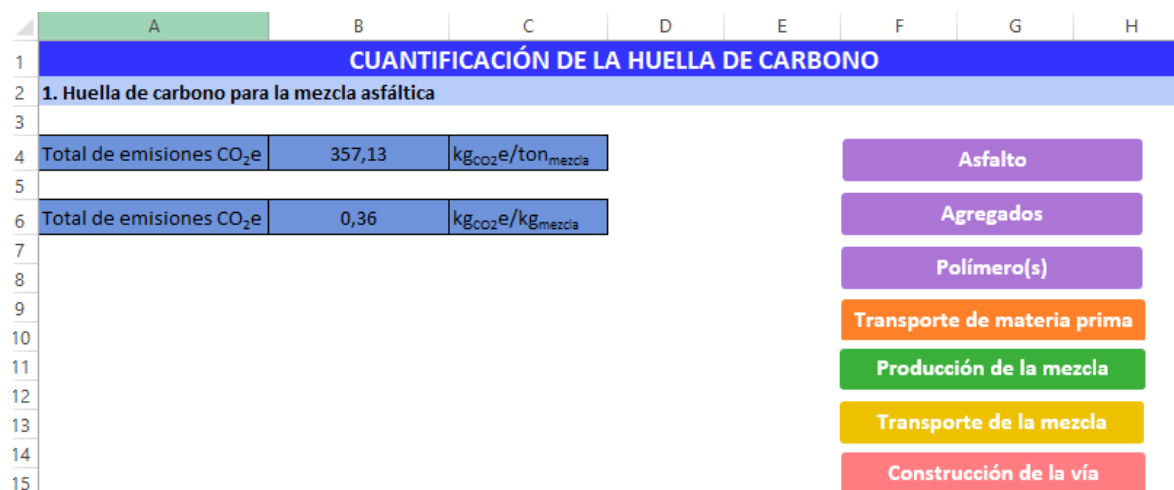


Figura 17. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.1, parte A

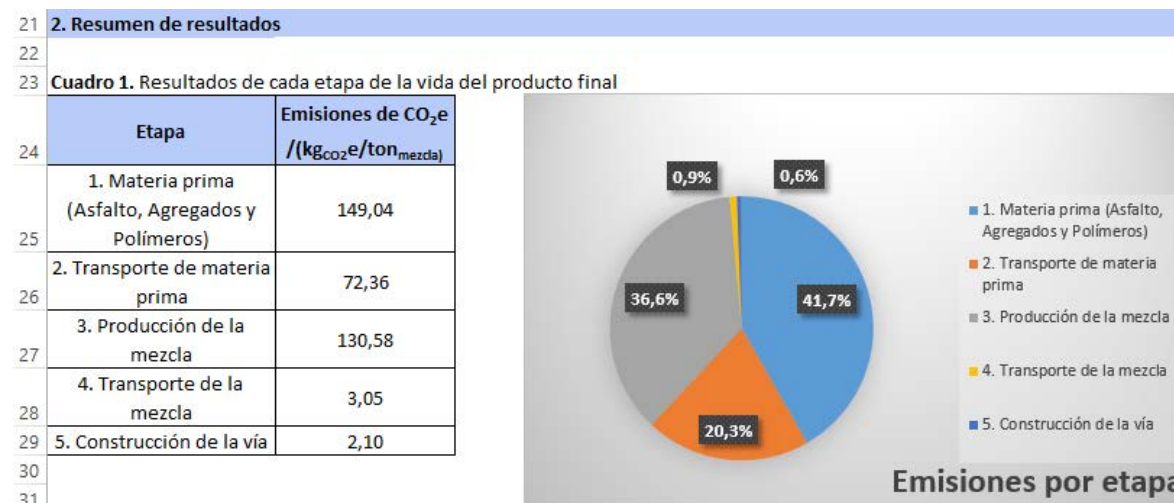


Figura 18. Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.1, parte B

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO</b>							
2	<b>1. Huella de carbono para la mezcla asfáltica</b>							
3								
4	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e	357,05	kg <sub>CO2</sub> e/ton <sub>mezcla</sub>					
5								
6	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e	0,36	kg <sub>CO2</sub> e/kg <sub>mezcla</sub>					
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

Asfalto

Agregados

Polímero(s)

Transporte de materia prima

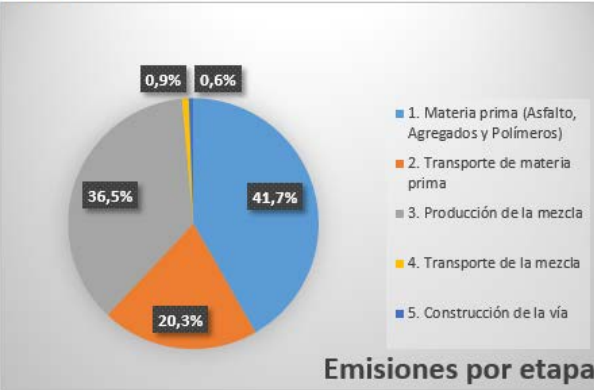
Producción de la mezcla

Transporte de la mezcla

Construcción de la vía

**Figura 19.** Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.2, parte A

2. Resumen de resultados	
23 Cuadro 1. Resultados de cada etapa de la vida del producto final	
Etapa	Emisiones de CO <sub>2</sub> e /(kg <sub>CO2</sub> e/ton <sub>mezcla</sub> )
1. Materia prima (Asfalto, Agregados y Polímeros)	149,04
2. Transporte de materia prima	72,36
3. Producción de la mezcla	130,50
4. Transporte de la mezcla	3,05
5. Construcción de la vía	2,10



**Emisiones por etapa**

- 1. Materia prima (Asfalto, Agregados y Polímeros)
- 2. Transporte de materia prima
- 3. Producción de la mezcla
- 4. Transporte de la mezcla
- 5. Construcción de la vía

**Figura 20.** Captura de pantalla de la salida de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono del escenario 3.2, parte B

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETRACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA HUELLA DE CARBONO Y DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL CASO DE ESTUDIO**

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada, y el análisis de los mismos. Aunado a esto, se incluyen comparaciones de distintas unidades funcionales de investigaciones previas que ayudan en la escogencia de la unidad funcional del estudio en discusión. De igual manera, se analizan diferentes etapas del ACV para mezclas asfálticas, las cuales proporcionan una base para la selección del alcance del proyecto. Se comparan globalmente diferentes ACV relacionados a mezclas asfálticas. Por último, se muestran posibles alternativas aplicables al caso de estudio como un aporte a la mitigación del cambio climático.

### **4.1. Análisis de la huella de carbono para el caso de estudio**

Con respecto al cálculo y la comparación de la huella de carbono, se analizaron los 3 escenarios descritos según el caso de estudio en la sección 2.2 y la cantidad de materiales involucrados para cada uno.

Se obtuvo la huella de carbono para cada escenario, representada por medio de las emisiones, en kilogramos, de dióxido de carbono equivalente por unidad funcional; donde la unidad funcional corresponde a 1 tonelada de mezcla asfáltica. El escenario 3 se divide en otros dos sub-casos, se le llama escenario 3.1 a la modificación de asfalto en una planta que funciona con combustible y el escenario 3.2 se refiere a la utilización de una planta eléctrica para modificar el asfalto. No hay diferencia en la masa de los materiales utilizados para estos dos últimos escenarios mencionados. Se toma la huella de carbono para el escenario 1 (asfalto original) como la base de la comparación ya que es el tipo de mezcla asfáltica más utilizada en el país e internacionalmente (LanammeUCR, 2018). Los resultados se observan en el Cuadro VIII.

**Cuadro VIII.** Huella de carbono para los diferentes escenarios analizados

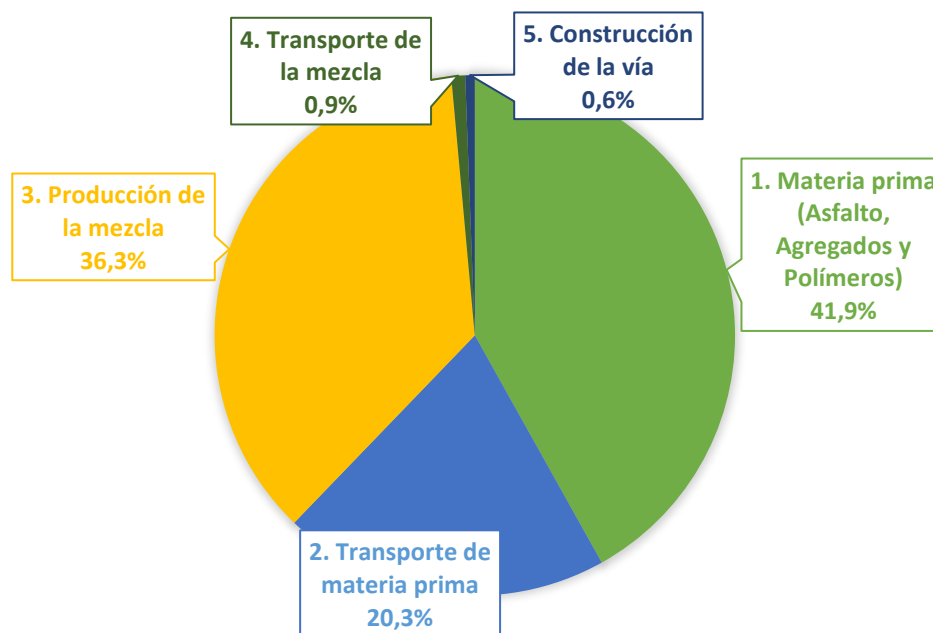
<b>Casos</b>	<b>Emisiones de dióxido de carbono equivalente /(kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub>)</b>	<b>Diferencia porcentual con respecto a la base /(%)</b>
Escenario 1 (original)	356,31	0
Escenario 2 (PET)	354,25	- 0,58
Escenario 3.1 (Elvaloy+PPA, planta combustible)	357,13	+ 0,23
Escenario 3.2 (Elvaloy+PPA, planta eléctrica)	357,05	+ 0,21

En términos generales, a partir del Cuadro VIII, se determina que la mayor huella de carbono corresponde a la del escenario 3.1, seguida muy de cerca por el escenario 3.2. Por debajo del escenario base (1) se encuentra el escenario 2, implicando la menor cantidad de emisiones de todos los casos estudiados.

La huella de carbono global de cada escenario se puede dividir en la huella de carbono individual para cada fase involucrada en el ACV. De esta manera, la Figura 21 muestra el aporte de cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono del asfalto original (escenario 1). La fase de producción de materia prima genera mayor aporte a la huella de carbono total, representando el 41,9% de las emisiones. Esta etapa incluye la extracción y producción de agregados, extracción y destilación del petróleo, transporte del asfalto de Estados Unidos a Costa Rica y almacenaje del material en RECOPE.

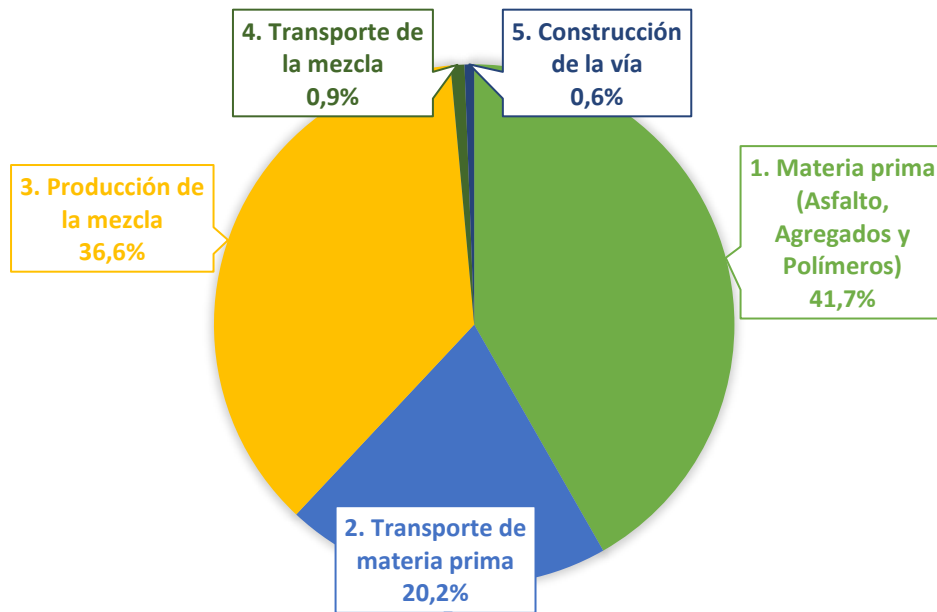
La producción de la mezcla asfáltica es la segunda etapa que más contribuye a la huella de carbono con un 36,3%, lo cual se le atribuye al consumo de gasóleo y de diésel. El transporte de materia prima desde su zona de distribución hasta la planta de mezcla asfáltica corresponde al 20,3% de las emisiones totales. El hecho de que cada tipo de material provenga de zonas diferentes, eleva las emisiones con respecto al transporte de solamente la mezcla asfáltica, con apenas un 0,9%. Por último, se encuentra la construcción en el sitio,

representando un 0,6%, etapa donde se requiere la menor cantidad de combustible debido al poco tiempo requerido para colocar la mezcla.

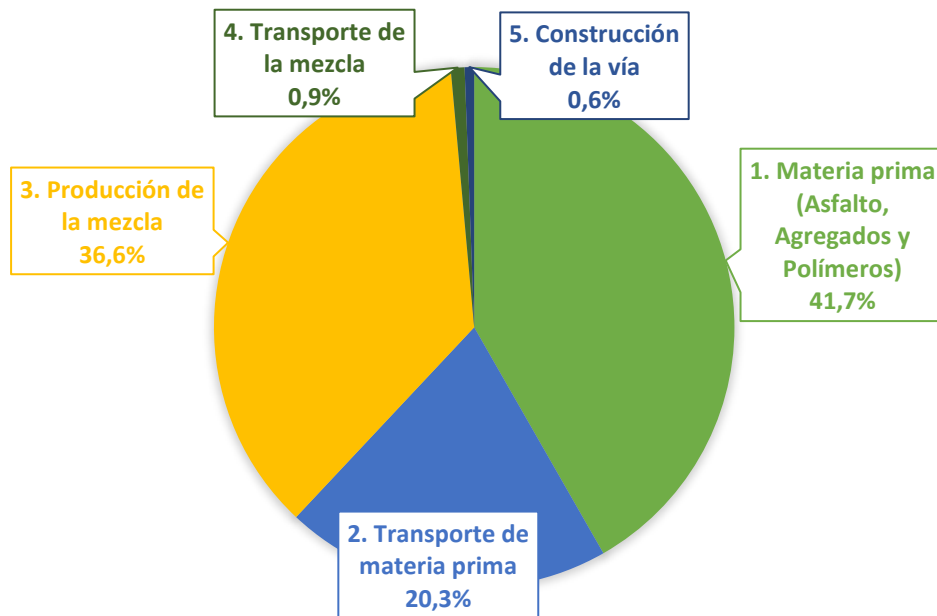


**Figura 21.** Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 1

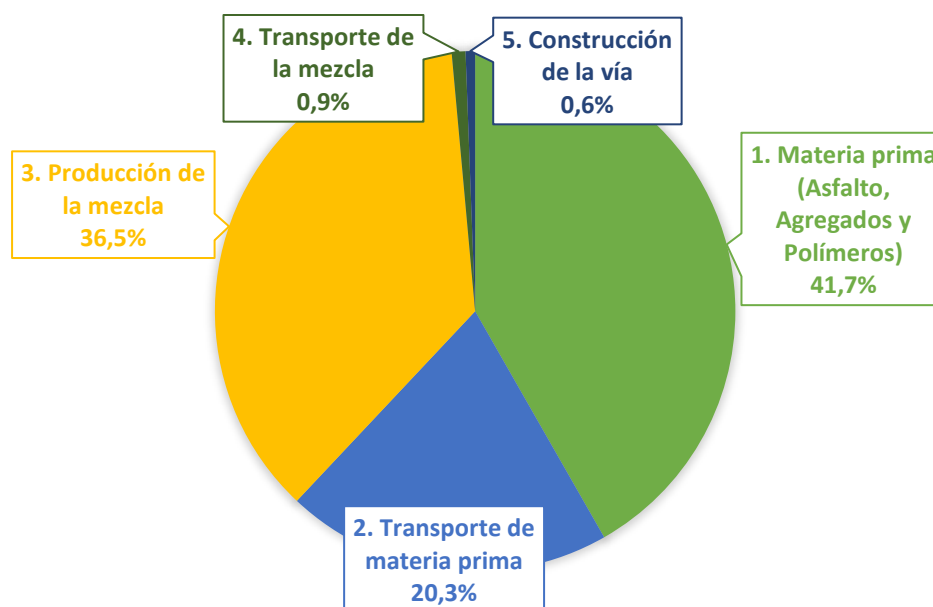
Un comportamiento similar al anterior se describe para los casos de la Figura 22, la Figura 23 y la Figura 24, el aporte de cada una de las emisiones totales se ordena de manera descendente a continuación: producción de materia prima, producción de mezcla asfáltica, transporte de materia prima, transporte de la mezcla asfáltica al sitio de construcción y construcción de los tramos.



**Figura 22.** Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 2



**Figura 23.** Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 3.1



**Figura 24.** Distribución del aporte cada etapa del ciclo de vida a la huella de carbono total para el escenario 3.2

Es de esperar que los resultados de emisiones de dióxido de carbono equivalente sean similares entre cada escenario. La razón principal es que no se varió ninguna condición de operación como la temperatura de producción, el tipo de combustible, ni fuentes de generación de energía, entre otros. Los cambios obtenidos en las emisiones reportadas se atribuyen en general a los diferentes materiales seleccionados para cada escenario y las variaciones de masa para cada uno. Seguidamente se presenta un análisis detallado y justificaciones de las diferencias observadas.

#### **4.1.1. Análisis general de las etapas del ciclo de vida para diferentes tipos de asfaltos**

Se requiere analizar más detalladamente las emisiones de dióxido de carbono equivalente obtenidas para cada etapa, dichos resultados se detallan en el Cuadro IX. Los datos subrayados indican el menor valor para cada fase y los datos en cursiva señalan el mayor valor de acuerdo con cada etapa. Esta indicación aplica para todos los cuadros en este capítulo.



Es importante aclarar que en todos los casos se transporta 1 tonelada de mezcla asfáltica al sitio de construcción y el material se coloca sobre un área con las mismas dimensiones. Además, las fases de transporte de mezcla asfáltica y la construcción en el sitio mostradas en el Cuadro IX, son iguales en todos los casos analizados.

**Cuadro IX.** Huella de carbono para cada etapa del ciclo de vida según cada escenario estudiado

Casos	Emisiones de dióxido de carbono equivalente /(kg CO <sub>2</sub> e/ton <sub>mezcla</sub> )				
	Producción materia prima	Transporte de materia prima	Producción de mezcla asfáltica	Transporte de la mezcla asfáltica	Construcción en el sitio
Escenario 1	149,26	72,38	129,52	3,05	2,10
Escenario 2	<u>147,88</u>	<u>71,71</u>	<u>129,51</u>	3,05	2,10
Escenario 3.1	149,04	72,36	130,58	3,05	2,10
Escenario 3.2	149,04	72,36	130,50	3,05	2,10

Al comparar todos los escenarios del Cuadro IX, la mayor cantidad de emisiones para la fase de producción de materia prima corresponde al escenario 1, y el menor es para el escenario 2, el cual incluye PET dentro de sus materiales. Por ser la etapa con el mayor porcentaje de influencia en la huella de carbono total, se va a analizar con más detalle posteriormente.

La cantidad de material transportado por cada materia prima afecta la cantidad de emisiones. Lo anterior se debe a que el combustible consumido está calculado en función de la cantidad de masa, según el inventario detallado en el Cuadro VII. Si se observa el Cuadro X, los agregados son los mayores contribuyentes con 0,076 kgCO<sub>2</sub>e y, el menor contribuidor es el PET reciclado presentando 0,0004 kgCO<sub>2</sub>e. De esta forma, entre mayor masa de material se transporte, mayores serán la emisiones reportadas.

Debido a que el escenario 2 utiliza la menor cantidad de agregados, mostrado en el Cuadro V, explicaría por qué presenta la menor huella de carbono en esta etapa. Además, según el Cuadro IX, el transporte de materia prima con mayores emisiones se encuentra para el

escenario 1. Este caso utiliza la mayor cantidad de masa de agregados y de asfalto (véase Cuadro V), y ya que ambos presentan los valores más altos de dióxido de carbono equivalente en el Cuadro X, concuerda con la presencia de resultados mayores para ese escenario.

**Cuadro X.** Emisiones de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de cada material pertenecientes a la etapa de transporte de materia prima

<b>Material</b>	<b>Emisiones de CO<sub>2</sub>e para cada material / ( kg<sub>CO2e</sub>/kg<sub>material</sub>)</b>
Asfalto	0,021
Agregados	0,076
PET reciclado	<u>0,0004</u>
Elvaloy y PPA	0,002

La producción de mezcla asfáltica con más emisiones de GEI es para el escenario 3.1, donde se utiliza una planta de combustible para la fabricación de asfalto modificado con Elvaloy y PPA, de acuerdo con el Cuadro IX. En esta área, la mayor diferencia recae en la modificación del asfalto, lo cual solamente ocurre para el escenario 3.1 y 3.2. Ambos escenarios contienen la menor masa de asfalto comparado con el resto de los escenarios (véase Cuadro V), razón por la cual el almacenamiento de asfalto en la planta utiliza la menor cantidad de combustible. La disminución en el uso de combustible implica menos emisiones, pero esta diferencia no compensa el consumo de combustible extra debido a la modificación del asfalto según el escenario 3.1 o el consumo eléctrico para el escenario 3.2.

Igualmente, la pequeña discrepancia entre los GEI emitidos por el escenario 3.1 y 3.2 se debe a las fuentes de energía utilizadas en la producción de asfalto modificado. A partir del Cuadro XI, se puede observar para la producción de 1 kg de asfalto modificado, el utilizar diésel como fuente de energía genera 9% más de emisiones que si se utiliza electricidad. Esta diferencia también se debe a la matriz energética de Costa Rica, la cual fue más de un 98% renovable para el 2019, por quinto año consecutivo (Castro, 2019).

**Cuadro XI.** Emisiones de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de asfalto modificado en la etapa de producción de mezcla asfáltica

Fuente de energía	Emisiones de CO <sub>2</sub> e por kg de asfalto modificado /( kgCO <sub>2</sub> e/kg <sub>asfalto modificado</sub> )
Diésel (Escenario 3.1)	0,0176
Electricidad (Escenario 3.2)	<u>0,0161</u>

Aunque las diferencias entre las emisiones del escenario 1 y 2 para la etapa de producción de mezcla asfáltica son muy pequeñas mostradas en el Cuadro IX. El escenario 2 presenta los menores resultados, con 129,51 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub>. Para el escenario 1 y 2, la etapa de producción de mezcla asfáltica incluye el almacenamiento de asfalto original, el funcionamiento del quemador y la producción de la mezcla asfáltica. De estas 3 actividades, solamente el almacenamiento del asfalto original está calculado a partir de la cantidad del ligante, donde el Cuadro V indica que la masa es menor en el escenario 2. El funcionamiento del quemador y la producción de la mezcla asfáltica se cuantificaron con una base 1 tonelada de mezcla asfáltica, por lo que no representan una fuente de variación entre las emisiones generadas para esta etapa del escenario 1 y 2. De esta manera se demuestra que la etapa de almacenamiento de asfalto es la responsable de la variación en estos resultados.

Para la modificación con Elvaloy se determinó por medio de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) e investigaciones como la de Singh et al. (2017), que este polímero corresponde a etilenvinilacetato. El análisis del polímero identificado como Elvaloy en FTIR se realizó en el LanammeUCR, ya que se tenía acceso al material, al equipo, y la obtención de resultados puede tardar menos de 10 minutos. Este dato genera información para poder corroborar resultados de ACV para mezclas asfálticas modificadas con EVA, como por ejemplo, en la investigación realizada por Santos et al. (2018).

En el ejemplo mencionado anteriormente, se analizó una mezcla con 5% de EVA añadida por una vía húmeda, la huella de carbono reportaba un aumento de un 8% comparada con

la mezcla asfáltica sin modificar (Santos, Cerezo, Soudani, & Bressi, 2018). Sin embargo, Santos et al. (2018) mencionan que el uso general del polímero EVA como agente modificador conduce a un deterioro del perfil ambiental del ciclo de vida en relación con una mezcla sin modificar (original). Esta conclusión resultó del análisis de 15 categorías de impacto ambiental (incluida la huella de carbono), donde para 12 de ellas, la mezcla modificada con EVA resultó ser la peor en comparación con la mezcla original. De esta forma, se corrobora que los resultados obtenidos dentro del presente estudio para el caso 3.1 y 3.2 presentan una tendencia normal de aumento en las emisiones de GEI al compararlo con el escenario base 1.

#### **4.1.2. Análisis de la fase de producción de materia prima**

Seguidamente, se analiza por medio de la información del Cuadro XII el aporte de cada material a las emisiones de GEI para la fase de producción de materia prima. Esta es la fase que genera las mayores contribuciones a la huella de carbono global para cada escenario estudiado.

**Cuadro XII.** Distribución por material de la huella de carbono para la fase de producción de materia prima

Casos	Emisiones de dióxido de carbono equivalente /(kg CO <sub>2</sub> e/ton <sub>mezcla</sub> )			
	Asfalto original	Agregados	Elvaloy + PPA	PET
Escenario 1	145,74	3,523	0,00	0,000
Escenario 2	144,38	<u>3,490</u>	0,00	0,012
Escenario 3.1	<u>143,73</u>	3,519	1,79	0,000
Escenario 3.2	<u>143,73</u>	3,519	1,79	0,000

Según los datos del Cuadro XII, en todos los escenarios el asfalto original aporta más del 96% de las emisiones de dióxido de carbono equivalente para la fase en análisis. Esto se debe a la extracción y el refinamiento del petróleo, conocidos como actividades altamente productoras de GEI. Puesto que el escenario 1 es el que utiliza la cantidad más alta de asfalto (véase Cuadro V), es el que va a presentar las emisiones mayores en esta fase. Caso

contrario ocurre con el escenario 3.1 y 3.2, ya que contienen la menor masa de asfalto, indicando una menor huella de carbono para esta sección.

Muy por debajo del asfalto original, representando entre el 2% y 3% de las emisiones relacionadas a la fase de producción de la materia prima, se encuentra la producción de agregados, donde la extracción de piedra del quebrador es la actividad que libera más GEI. A partir de este hallazgo, se determina que una mayor cantidad de material genera mayores emisiones, demostrado con las emisiones del escenario 1, al caracterizarse por contener la mayor masa de agregados. Debido a que el PET reciclado sustituye un 1% de los agregados, el escenario 2 es el que posee una menor masa de agregados, concordando con los resultados de las menores emisiones de dióxido de carbono equivalente.

La comparación de los polímeros modificadores utilizados en el escenario 2 y 3 es de suma importancia, ya que generan diferencias en el diseño de mezcla y, por ende, en la huella de carbono de cada producto final. De acuerdo con el Cuadro XII, la huella de carbono para el PET reciclado es 149 veces más pequeña que la del Elvaloy y PPA. Esta diferencia deriva de hecho que las emisiones generadas para un material reciclado son diferentes las de uno que no lo es. Con respecto a la cuantificación de la huella de carbono del PET reciclado, se analizan actividades de transporte del material recolectado y trituración, mientras que no es necesario incluir la producción inicial del PET porque estas emisiones corresponden a la materia prima sin reciclar, la cual no es analizada dentro de este ACV (Ecoinvent, 2013). Por otra parte, para los polímeros utilizados en el escenario 3 (Elvaloy y PPA), se cuantifican las emisiones desde el procesamiento de su materia prima respectiva, hasta su transporte y su producción. De esta manera, los materiales reciclados y los no reciclados van a presentar diferencias en la huella de carbono debido a los procesos que se contabilizan en cada caso.

Una de las intenciones de utilizar un material reciclado dentro de un ACV es disminuir emisiones, estos materiales ya cumplieron su vida útil, en la cual se cuantificó su huella de

carbono correspondiente al ciclo de vida. Al ser reinsertados en un sistema nuevo, no deben cuantificar las emisiones de toda su vida, exceptuando las atribuidas al transporte y reproceso del material reciclado.

#### **4.1.3. Comparación 1 kg PET versus 1 kg de Elvaloy y PPA**

De acuerdo con el diseño de mezcla, se utiliza un 1% de PET para el escenario 1 y, para el escenario 3 un 1,2% de Elvaloy y 0,2% de PPA. Sin embargo, es importante destacar que para comparar estos porcentajes se debe tomar en cuenta la cantidad de masa respectiva. La razón se debe a que el PET se agregó por vía seca, sustituyendo un porcentaje de los agregados, mientras que el Elvaloy y PPA se añaden por un método húmedo, reemplazando una fracción del asfalto original. De tal manera que para obtener una mezcla con un 1% de PET como sustitución de agregados (vía seca), implica la utilización de 9,3 kg de este material, lo que corresponde a 0,93% en peso por tonelada de mezcla. Por otro lado, para elaborar una mezcla con 1,2% de Elvaloy y 0,2% de PPA como sustitución de asfalto (vía húmeda), comprende mientras que 0,72 kg de Elvaloy y 0,12 kg de PPA representan el 0,084% de masa por tonelada de mezcla. En resumen, estos porcentajes indican que a pesar de que la masa de PET reciclado es 11 veces mayor a la masa de Elvaloy más PPA, el PET genera menos emisiones.

Las diferencias de masa mencionadas anteriormente no permiten observar claramente la huella de carbono de cada polímero, por lo que con el objetivo de contrastar 1 a 1 estos resultados, el Cuadro XIII muestra las emisiones de GEI para 1 kg de PET reciclado y 1 kg de Elvaloy con PPA. Las emisiones para la mezcla de Elvaloy y PPA son notoriamente mayores, alrededor de 1775 veces más grandes que las emisiones del PET reciclado; razón por la cual se ven reflejados los beneficios ambientales con respecto a la disminución de GEI y de desechos al utilizar un polímero reciclado (PET).

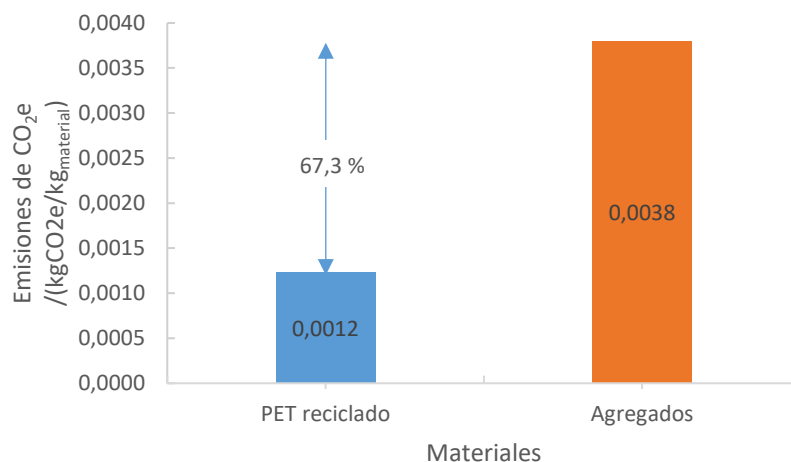
**Cuadro XIII.** Comparación de la huella de carbono para los polímeros utilizados en los escenarios 2 y 3

<b>Tipo de polímero</b>	<b>Composición</b>	<b>Emisiones de dióxido de carbono equivalente /((kg CO<sub>2</sub>e/kg<sub>polímero</sub>))</b>
Elvaloy y PPA	85,7% Elvaloy y 14,3% PPA	2,13
PET reciclado	100% PET	0,0012

#### **4.1.4. Comparación 1 kg agregados versus 1 kg PET**

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, en el escenario 2 se sustituye 1% de los agregados por PET reciclado, así que una comparación entre ambos materiales permite una mejor comprensión de los beneficios obtenidos al aplicarlo. La comparación 1 a 1 del PET reciclado y los agregados se muestra en la Figura 25, donde la huella de carbono para 1 kilogramo de PET reciclado es igual a 0,0012 kgCO<sub>2</sub>e, mientras que la huella de carbono de 1 kilogramo de agregados (62% corresponde a polvos finos y 38% a quintilla) es de 0,0038 kgCO<sub>2</sub>e, reflejando una diferencia de 67,3% entre ellas.

Al contrastar estos valores se identifica que las emisiones generadas por parte de los agregados son 3 veces mayores a las del PET reciclado. Dicho resultado afirma el hecho de que sustituyendo agregados por este polímero reciclado, según el diseño de mezcla, se disminuye la huella de carbono final. Asimismo, de acuerdo con el diseño de mezcla descrito en el Cuadro V, no solamente varía la masa de agregados requerida, sino que también disminuye la masa de asfalto, ayudando a la disminución de la huella de carbono resultante.

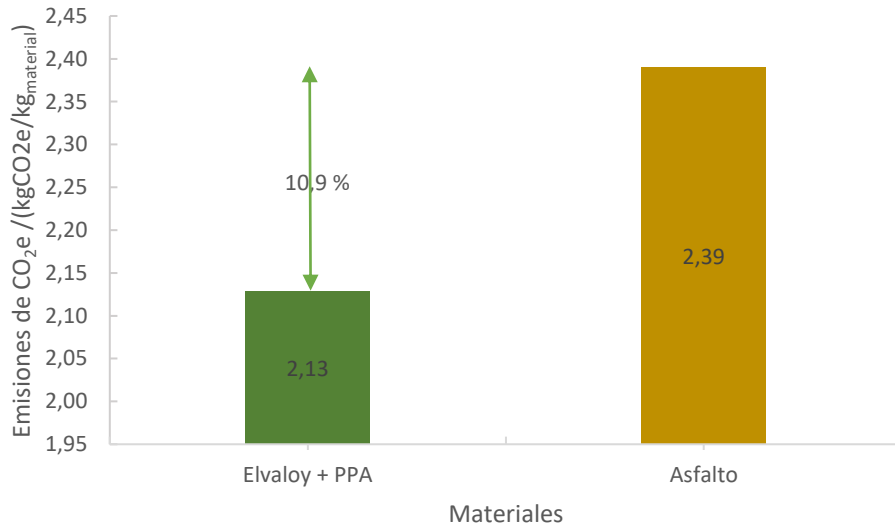


**Figura 25.** Comparación de la huella de carbono para 1 kg de agregados y 1 kg de PET reciclado

#### **4.1.5. Comparación de 1 kg asfalto versus 1 kg Elvaloy y PPA**

En el escenario 3, la modificación con Elvaloy y PPA ocurre por medio de una vía húmeda, razón por la cual se compara 1 kg de asfalto con 1 kg de la mezcla de estos polímeros (85,7% Elvaloy y 14,3% PPA). De acuerdo con los valores presentados en la Figura 26, la huella de carbono del asfalto es 10,9% mayor que la del Elvaloy y PPA. Aunque la diferencia es pequeña, igualmente disminuye la huella de carbono total por dos razones. Primero ocurre por la sustitución de una parte del asfalto por los polímeros, y segundo, por una baja en la cantidad de agregados según lo indica el diseño de mezcla en el Cuadro V. No obstante, por medio de los resultados generales del Cuadro VIII, es evidente que al tomar en cuenta la mezcla asfáltica como producto final, la diferencia no compensa las emisiones del combustible adicional requerido para la producción de asfalto modificado.





**Figura 26.** Comparación de la huella de carbono para 1 kg de Elvaloy y PPA con 1 kg de asfalto

En general, según muestra el Cuadro V, al utilizar un polímero dentro de la mezcla, ya sea agregándolo por medio de una vía húmeda o una vía seca, disminuye la masa de asfalto y de agregados requerida. De esta forma, se observa una variación de emisiones de dióxido de carbono equivalente para la fase de producción de materia prima.

#### **4.1.6. Huella de carbono para tramos en el LanammeUCR y caso hipotético de 1 km**

A partir de las dimensiones descritas en el Cuadro II y la información recopilada por medio de la empresa encargada de la construcción de los tramos, se determinó la huella de carbono para todo el proyecto, mostrada en el Cuadro XIV, en donde se utilizó una masa de 12,135 toneladas de mezcla asfáltica para cada tramo. Como se especificó anteriormente, se toma el escenario 1 como base de comparación. El porcentaje de diferencia del escenario 2, 3.1 y 3.2 con respecto al escenario 1 se observa en la columna 3 del Cuadro XIV.

**Cuadro XIV.** Huella de carbono para el tramo construido en el LanammeUCR según los diferentes escenarios analizados

<b>Casos</b>	<b>Emisiones de dióxido de carbono equivalente / (kg CO<sub>2</sub>e/tramo)</b>	<b>Diferencia de masa de dióxido de carbono equivalente entre escenarios / (kgCO<sub>2</sub>e)</b>
Escenario 1	4 324	0,00
Escenario 2	4 299	-25,0
Escenario 3.1	4 334	10,0
Escenario 3.2	4 333	9,0

Según el Cuadro VIII, la disminución de emisiones de GEI puede aparentar ser insignificante, ya que la mayor diferencia presentada para el escenario 1 y 2 es de 0,58%, lo cual equivale aproximadamente a 2 kg de dióxido de carbono equivalente. Sin embargo, las diferencias aumentan al elevar a escalas mayores estos resultados. Aplicando este análisis al proyecto construido en el LanammeUCR, el Cuadro XIV señala una diferencia de 25 kgCO<sub>2</sub>e cuando se utiliza PET reciclado dentro del producto final contrastado con una mezcla sin ningún polímero adicionado.

Por otra parte, el tramo construido en el LanammeUCR tiene fines experimentales, por lo que su longitud es menor a lo que sería la construcción de una carretera de uso público. Esto implicaría mayores dimensiones y ahorros, en término de emisiones de GEI, si se utiliza PET reciclado como polímero modificante en un proyecto de mayor magnitud.

Con la finalidad de estudiar un escenario más cercano a la realidad, se analiza la construcción de 1 km de vía, mostrando los resultados en el Cuadro XV. Los resultados muestran el contraste de kilogramos de dióxido de carbono equivalente que se dejarían de emitir según cada escenario. Un total de 1 132 kgCO<sub>2</sub>e se evitarían liberar al ambiente para el escenario 2, y este valor aumentaría conforme lo haga el tamaño del proyecto. De esta manera, se puede confirmar que una buena opción para colaborar con la mitigación del cambio climático es aplicar el uso de PET reciclado dentro de una mezcla asfáltica.

**Cuadro XV.** Huella de carbono para un tramo de 1 km de longitud y 2,05 m de ancho

<b>Casos</b>	<b>Emisiones de dióxido de carbono equivalente / (kg CO<sub>2</sub>e/km de tramo)</b>	<b>Diferencia de masa de dióxido de carbono equivalente entre escenarios / (kgCO<sub>2</sub>e)</b>
Escenario	196 178	0
Escenario 2	195 047	-1 132
Escenario 3.1	196 634	456
Escenario 3.2	196 586	408

#### **4.1.7. Análisis del PET reciclado como agente modificador en un asfalto verde**

Por medio de los resultados mostrados en esta investigación y estudios previos, se ha determinado que el PET reciclado genera una disminución de la huella de carbono cuando se utiliza como polímero modificante en mezclas asfálticas. De esta forma, entre mayor cantidad de PET reciclado se utilice, más baja va a ser la huella de carbono global, pero no se debe perder de vista el objetivo de construir una vía que cumpla con todas las normas de calidad y desempeño establecidas. Esta es la razón por la que muchos investigadores han probado diferentes porcentajes de PET reciclado.

Aunque en el caso de estudio se seleccionó 1% de PET reciclado (porcentaje reportado en masa de los agregados), en otros países han utilizado porcentajes mayores de PET en la construcción de carreteras. Como es el caso de Rojas (2019), donde se construye una ciclo vía sustituyendo el 6% de los agregados por PET reciclado. Además de que utilizan más cantidad de PET, también hay una gran diferencia en la producción, ya que reducen la temperatura de producción para obtener una mezcla asfáltica tibia. Rojas (2019) indica que es posible producir la mezcla con PET reciclado a 130 °C, lo cual genera mayores disminuciones en la huella de carbono, en comparación con una mezcla asfáltica en caliente. Las mezclas desarrolladas en la investigación actual se producen a 162 °C, lo cual también eleva el consumo energético y, por ende, las emisiones de GEI.

No obstante, se supone que la mezcla asfáltica de uno de los tramos construidos en el LanammeUCR contiene 6% de PET reciclado con el objetivo de evaluar un escenario en el

que se hubiera agregado más cantidad de este polímero. Las diferencias de emisiones de dióxido de carbono equivalente entre escenarios se muestran en el Cuadro XVI.

**Cuadro XVI.** Comparación de casos con diferentes porcentajes de PET reciclado

<b>Casos</b>	<b>Emisiones de dióxido de carbono equivalente <math>/(kgCO_2e/ton_{mezcla})</math></b>	<b>Porcentaje de diferencia de emisiones de <math>CO_2e</math> entre escenarios <math>/(%)</math></b>
Escenario 1: 0% PET	356,31	0,0
Escenario 2: 1% PET	354,25	0,6
Escenario 2.2: 6% PET	344,57	3,3

Los porcentajes de diferencia resultantes se encuentran por debajo del 4%, exactamente un 3,3%. Sin embargo, los resultados de Rojas (2019) indican una diferencia de un 2,85% entre una mezcla asfáltica en caliente sin ningún agente modificador y otra con 6% de PET. La comparación no es totalmente equiparable entre los resultados para los tramos del LanammeUCR y los realizados por Rojas (2019), ya que este autor incluye la etapa de mantenimiento de la carretera, que no se analiza en la investigación en desarrollo, y también utiliza una mezcla asfáltica tibia, mientras que la mezcla asfáltica del estudio actual es en caliente.

En las secciones construidas en el LanammeUCR no se aplicó ninguna modificación de procedimiento dentro de la producción, como por ejemplo reducción de tiempos en alguna operación o disminución de temperatura al mezclar. Solamente se realizó el cambio de material, por lo que las diferencias entre la huella de carbono del escenario 1 y 2 se deben a la implementación de este polímero reciclado. De esta forma, sería de esperar que, si se aplicara un cambio en la temperatura para producir una mezcla asfáltica tibia, al igual que Rojas (2019), con las condiciones de estudio actuales, se presentaría menos emisiones de GEI.

Al no modificar ningún proceso que generara alguna diferencia mayor en la huella de carbono entre el escenario 1 y 2, aparte de la incorporación de PET reciclado, es importante

resaltar que con el escenario 2 se mostró una disminución de emisiones de GEI y a la vez se está dando un segundo uso a un material que en otra situación sería tratado como desecho. Como se destacó en el Cuadro VIII, se requiere de 9,3 kg de PET reciclado en la producción de 1 ton de mezcla asfáltica. Si una botella de PET promedio de 500 mL posee una masa de 25 g, se requerirían 372 botellas para la fabricación de 1 ton de mezcla. Siguiendo esta misma lógica, para el tramo construido en el LanammeUCR se utilizaron 4 514 botellas aproximadamente, y en el caso hipotético de la construcción de 1 km de carretera, se utilizarían 204 819 botellas. Al implementar estos cambios, se evita que esta gran cantidad de material termine en vertederos o circulando en el planeta y a la misma vez, ayuda a la mitigación del cambio climático.

#### **4.2. Comparaciones de ACV de mezclas asfálticas con respecto al caso de estudio**

Además de analizar los resultados y compararlos entre ellos mismos, se contrastan con los ACV de otros artículos. Las diferencias más notables entre diferentes ACV corresponden a las unidades funcionales y las etapas del ciclo de vida para las mezclas asfálticas. Ambas propiedad del ACV son determinantes en los resultados, ya que brindan una base para comenzar y desarrollar el estudio. Por tanto, la comparación entre unidades funcionales y entre etapas del ciclo de vida brinda información relevante sobre los diferentes efectos ambientales generados por varios ACV realizados en distintos contextos.

##### **4.2.1. Comparación de unidades funcionales para ACV de mezclas asfálticas**

La unidad funcional proporciona la base de un ACV, ya que los resultados van a estar normalizados en términos de ella. En el caso de los ACV para mezclas asfálticas es común utilizar ciertas unidades funcionales que describen el sistema seleccionado para el estudio. Para su escogencia se revisaron investigaciones previas sobre ACV de mezclas asfálticas, las unidades funcionales más utilizadas se resumen en el Cuadro XVII.

**Cuadro XVII.** Resumen de unidades funcionales para diferentes casos de estudio

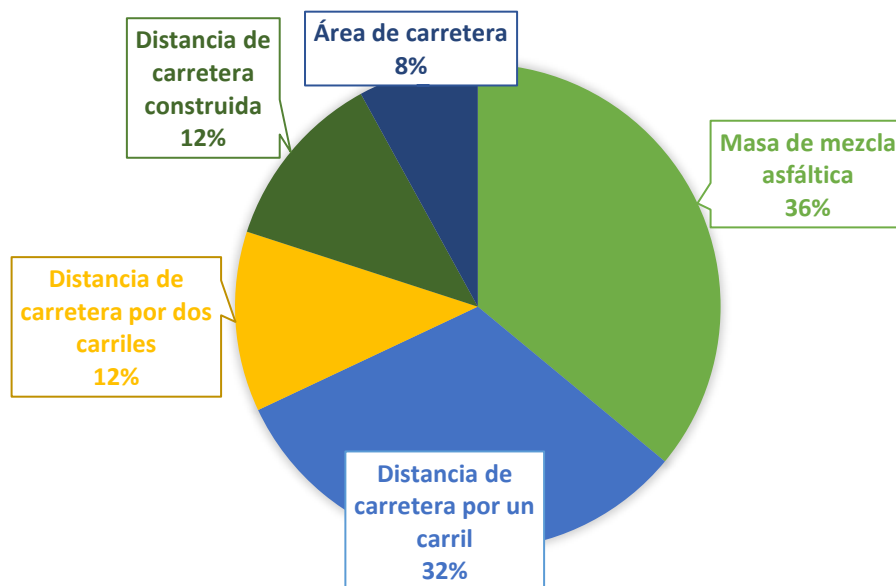
Unidad funcional	Unidades de emisiones	Referencia
Tonelada de mezcla asfáltica	kg CO <sub>2</sub> e/t <sub>mezcla</sub>	Sampedro et al. (2012)
		Van de Ven, Jenkins y Van den Beemt (2012)
		Peng et al. (2015)
		Mukherjee (2016)
		Baptiste et al. (2016)
		Mukherjee, Dylla y Willis (2016)
		Tahmoorian et al. (2019)
Tonelada de mezcla asfáltica	mg CO <sub>2</sub> e /t <sub>mezcla</sub>	Peng, Fan, Wang y Li (2017)
Kilogramo de mezcla asfáltica	kg CO <sub>2</sub> e /kg <sub>mezcla</sub>	Ivel et al. (2019)
Milla de carretera por carril	t CO <sub>2</sub> e/milla*carril	Kang et al. (2014)
		Kar et al. (2015)
		Ziyadi, Ozer y Al-Qadi (2017)
Milla de carretera por carril	kg CO <sub>2</sub> e/milla*carril	Al-Qadi et al. (2015)
		Leng, Al-Qadi y Cao (2017)
Kilómetro de carretera por carril	kg CO <sub>2</sub> e/km*carril	Calahorra et al. (2016)
		Schlegel et al. (2016)
Kilómetro de carretera por dos carriles con espaldón	kg CO <sub>2</sub> e/km*2 carriles	Mazumder et al. (2016)
Kilómetro de carretera por dos carriles	kg CO <sub>2</sub> e/km*2 carriles	Santosa, Cerezob y Bressid (2018)
		Arroyo et al. (2018)
Kilómetros de carretera por cantidad de carriles (20 km de 4 carriles)	kg CO <sub>2</sub> e/20 km*4 carriles	Ma et al. (2016)
Kilómetro de carretera por ancho de carril	t CO <sub>2</sub> e/km* ancho de carril	Butt, Birgisson y Kringos (2016)
Kilómetro de carretera construido	t CO <sub>2</sub> e/km <sub>carretera</sub>	Kar, Behl, Shukla y Jain (2015)
Kilómetro de ciclo vía	kg CO <sub>2</sub> e/km	Rojas (2019)
Tramo de carretera (240 m <sup>2</sup> por año)	kg CO <sub>2</sub> e/240 m <sup>2</sup> *año	Johansson (2018)
Panel representativo de pavimento asfáltico	t CO <sub>2</sub> e/panel	Kar et al. (2015)

A partir de la información proporcionada en el Cuadro XVII, se agruparon las unidades funcionales similares, para así obtener la clasificación en el Cuadro XVIII. Es importante recalcar que la categoría “distancia de carretera por un carril” posee 9 casos donde 8 de ellos utilizan tonelada como unidad para masa y solamente 1 hace uso de kilogramo. Una situación similar ocurre con la categoría “distancia de carretera por carril”, donde 5 de los 8 casos emplean milla como unidad para indicar longitud y los restantes 3 kilómetro.

**Cuadro XVIII.** Categorización de las unidades funcionales revisadas en el Cuadro XVII y la cantidad de artículos que utilizan la unidad funcional respectiva

<b>Clasificación</b>	<b>Cantidad de artículos</b>
Masa de mezcla asfáltica	9
Distancia de carretera por un carril	8
Distancia de carretera por dos carriles	3
Distancia de carretera construida	3
Área de carretera	2
<b>Total</b>	<b>25</b>

A partir de la información categorizada en el Cuadro XVIII, se muestra la distribución según porcentajes en la Figura 27. Es posible observar que la unidad funcional con un 36% de los casos corresponde a “masa de mezcla asfáltica”, seguida con un 32% para “distancia de carretera por un carril”. La selección de unidad funcional para este estudio propiamente se basa en estas dos mencionadas anteriormente, ya que son las más comunes dentro de este tipo de investigaciones.



**Figura 27.** Distribución porcentual de las unidades funcionales revisadas en el Cuadro XVII

La unidad funcional de “distancia de carretera por un carril” puede variar según el espesor de la capa, el ancho del carril, si incluye o no el espaldón; propiedades que generan diferencias al momento de comparar con otros estudios que seleccionaron dicha unidad, por tanto, no se eligió en este estudio para reportar los resultados. Por otra parte, las distancias estándar corresponden a 1 kilómetro o 1 milla, mientras que el tramo construido en el Lanamme tiene una distancia de 22,04 m, por lo que si se escogiera esta unidad funcional. No obstante, esta última situación no representa un impedimento, ya que los resultados sí se pueden extrapolar a proyectos de mayor tamaño.

Debido a que 1 tonelada de mezcla asfáltica no va a variar según las dimensiones de la carretera por construir, se escoge “masa de mezcla asfáltica” como unidad funcional para el presente estudio. Además, se escoge la unidad de tonelada para mostrar los resultados de una manera más sencilla, con dimensiones más pequeñas, y se identificó como la unidad funcional más utilizada dentro de los ejemplos revisados.

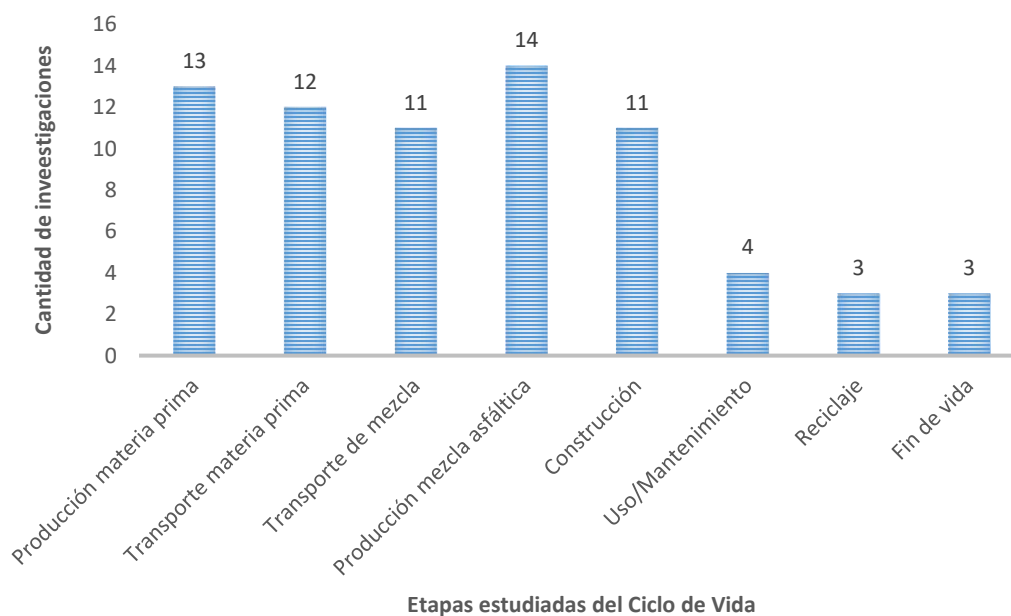


#### **4.2.2. Comparación de las etapas del ciclo de vida estudiadas**

Como se especificó en los límites del sistema (véase sección 2.5, Límites del sistema), en la presente investigación se utiliza un enfoque llamado de la cuna a la tierra. Este enfoque es de los más estudiados para los ACV de asfaltos y mezclas asfálticas. Por definición, abarca desde la fabricación de la materia prima hasta que llega a las manos del consumidor (Han, Oneil, Bergman, Eastin, & Johnson, 2015), lo cual implicaría hasta el momento en que la vía está construida sin incluir el uso.

Se analizaron las etapas estudiadas dentro de 14 investigaciones relacionadas al ACV de diferentes tipos de mezclas asfálticas para graficar los resultados según la Figura 28 (véase cuadro con datos en Apéndices sección B.1). Se evidencia que el total de los estudios incluye la etapa de producción de mezcla asfáltica, confirmando lo esperado ya en esta fase se obtiene el producto en estudio. Asimismo, 13 de estos ACV involucran la fase de producción de materia prima, clasificándose como análisis que parten desde la cuna.

Igualmente, la Figura 28 señala que las fases relacionadas al transporte de materiales o producto final también son estudiadas por la mayoría de los investigadores, al igual que la etapa de construcción. Caso contrario sucede con la etapa de uso/mantenimiento, reciclaje y fin de la vida. Estos últimos tres momentos de la vida del producto son más difíciles de estimar debido a que requieren mucho tiempo de análisis (inclusive años), situaciones difíciles de estimar al 100% como comportamiento del tráfico y condiciones climáticas, entre otros. Según Santos et al. (2018), los impactos ambientales generados en las etapas de construcción, mantenimiento y rehabilitación pueden omitirse en la comparación de diferentes mezclas asfálticas, siempre que las dimensiones de los tramos construidos y alcance no varíe, ya que no van a generar diferencias en los resultados finales. En consecuencia, lo anterior justifica la selección de una delimitación de la cuna a la tierra en el presente estudio.



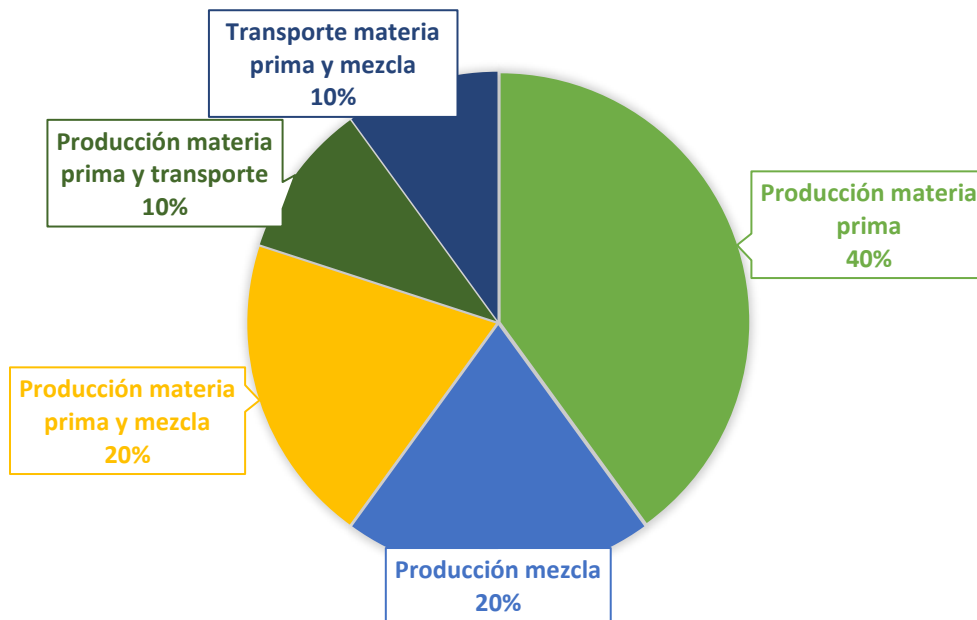
**Figura 28.** Etapas estudiadas en el ciclo de vida de mezclas asfálticas reportadas en la literatura

Es importante recalcar que varios autores no toman en cuenta el transporte de la mezcla porque la producen en el sitio de construcción, por medio de plantas móviles. Por otro lado, otros indican que como criterio general se puede agrupar todo el transporte entre etapas del proceso, incluyendo la materia prima y la mezcla producida, para presentar los resultados como una sola actividad (Sampedro, Del Val, Gallego, Querol, & Del Pozo, 2012).

De las referencias analizadas previamente, se determinó el orden de importancia de cada etapa basándose en la cantidad de emisiones de GEI que generan. De acuerdo con la Figura 29, la producción de materia prima representa el 40% de los casos donde es la etapa que emite mayor cantidad de dióxido de carbono equivalente, confirmando de nuevo la escogencia de tomarla en cuenta dentro del ACV.

Se destacan al menos dos artículos que unen la producción de materia prima y mezcla, pero al ser etapas muy relevantes se decide separarlas para analizar de una manera más

detallada el efecto de cada una sobre la huella de carbono total. La etapa de construcción no se incluye por varias investigaciones, pero alrededor de un 75% de los artículos comparados sí la analiza. Su importancia radica en que las emisiones de esta fase pueden variar según el tipo de modificación con polímero que se escoja, la productividad de la planta, el combustible escogido, entre otros.



**Figura 29.** Etapas analizadas más significativas en el ACV de mezclas asfálticas según varias investigaciones previas

La gran mayoría de las investigaciones consultadas concuerda en que el mayor contribuidor a la huella de carbono de una mezcla asfáltica es la etapa de producción, ya sea de materia prima o de la mezcla, aunque también algunas son sensibles a los procesos de transporte.

#### **4.2.3. Comparación de la huella de carbono de varios ACV para mezclas asfálticas**

En la comparación de resultados para ACV realizados alrededor del mundo sobre pavimentos asfálticos, es usual que difieran entre sí. Esta situación se puede atribuir en general a la zona geográfica, el objetivo de la investigación, la unidad funcional

seleccionada, las etapas del ciclo de vida analizadas, los materiales utilizados, la tecnología o innovación en equipo, la fecha de realización el análisis, entre otros.

La zona geográfica influye en los resultados, principalmente por las variaciones de distancia entre países, ya sea del transporte marítimo utilizado en la importación del asfalto o las distancias internas para trasladar materia prima y mezcla asfáltica. Igualmente, el alcance seleccionado define las etapas de la vida del producto que se van a estudiar, lo cual genera discrepancias en las emisiones de acuerdo con las etapas involucradas.

Los estudios presentados en Cuadro XIX abarcan una amplia gama de materiales que se pueden utilizar en mezclas asfálticas, demostrando que su escogencia y el diseño de mezcla afectan los resultados finales de la huella de carbono. Además, los diferentes proveedores de cada materia prima y la manera en que se produjo también poseen un gran peso en cuanto a las emisiones generadas. Este punto es muy relevante, ya que según se ha estudiado la producción de materia prima es una de las etapas con mayor peso en este tipo de ACV.

Debido a que la fase de producción de materia prima y de mezcla asfáltica se destacan como las etapas de mayor importancia, la tecnología involucrada dentro de cada una de ellas también puede generar efectos adversos o beneficiosos. La antigüedad de los equipos, la innovación, las diferentes fuentes de energía, los ahorros energéticos, son algunos de los factores que podrían generar un aumento o disminución en la huella de carbono.

Además, la fecha en la que se realizó el estudio es importante, ya que los datos como factores de emisión de cada país o globales, las bases de datos o investigaciones, pueden variar con el paso del tiempo. De esta manera, lo más recomendable es utilizar los datos más actualizados, a menos de que sean valores estables que no varíen con el transcurso del tiempo como los potenciales de calentamiento global.

No obstante, la diferencia más relevante se origina en la forma como se recopiló la información, la cual puede provenir de bases de datos, de otros estudios previos, de los proveedores de materia prima o del mismo sistema en estudio. Dependiendo de la base de datos, las emisiones para un mismo producto pueden variar hasta un 150% (Álvarez, 2014), por lo que su escogencia puede generar impactos en los resultados. Asimismo, los métodos de asignación de emisiones afectan los resultados.

Por esta razón se destaca la importancia de señalar la zona geográfica y el periodo de tiempo que abarcan los resultados relacionados a cada ACV. El Cuadro XIX señala las principales diferencias entre varias investigaciones, destacando los datos de mayor importancia para cada una de ellas y la huella de carbono por tonelada de mezcla asfáltica. En la columna 5 se detallan los materiales involucrados en cada estudio, destacando que cuando se menciona “mezcla asfáltica en caliente (HMA)” o “mezcla asfáltica tibia (WMA)”, involucra los materiales principales correspondientes a asfalto original y agregados pétreos.

En la comparación de diferentes huellas de carbono de varios ACV es necesario el uso de la misma unidad funcional como normalización de los resultados. El Cuadro XIX ejemplifica varios casos donde esta situación no ocurre. Tal es la situación de la investigación realizada por Leng, Al-Qadi y Cao (2017), Arroyo et al. (2018), Santos et al. (2018) y Rojas (2019). Por tal razón, se aplica una conversión de unidad funcional a tonelada de mezcla asfáltica utilizando las dimensiones de los proyectos. Los cálculos realizados se detallan en la sección C.5 y el Cuadro XXI expone los valores originales para cada estudio.

**Cuadro XIX.** Comparación de varios estudios sobre el ACV de pavimentos asfálticos a nivel global

Locación	Alcance	Etapas analizadas	Casos estudiados	Emisiones CO <sub>2</sub> e (kg/ton <sub>mezcla</sub> )	Referencia	Notas
España	De la cuna a la tierra	Producción de materia prima, producción mezcla, construcción, demolición (producción RAP <sup>1</sup> ), transporte materia prima y mezcla	1. HMA <sup>2</sup>	61,87	Sampedro, Del Val, Gallego, Querol y Del Pozo (2012)	Asfalto de refinerías europeas. Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid
			2. HMA RAP20%	57,71		
			3. HMA RAP 70%	53,50		
			4. HMA RAP-NFU <sup>3</sup> 20%	54,53		
			5. HMA RAP-NFU 50%	58,74		
Holanda	De la cuna a la tumba	Producción materia prima, producción mezcla, transporte mezcla, reciclaje	1. HMA RAP 50%	57,85	Van de Ven, Jenkins y Van den Beemt (2012)	Planta para producción de mezcla funciona con GLP <sup>5</sup>
			2. WMA <sup>4</sup> RAP 50%	44,50		
Estados Unidos	N.A.	Producción de materia prima, transporte de materia prima, producción mezcla	1. HMA	58,6	Mukherjee (2016)	No incluye el transporte de la mezcla, ni la construcción de la carretera
			2. HMA RAP 15% RAS <sup>6</sup> 3%	35,9		
			3. HMA RAP 20%	38,5		
			4. HMA RAP 35%	51,3		

Locación	Alcance	Etapas analizadas	Casos estudiados	Emisiones CO <sub>2</sub> e (kg/ton <sub>mezcla</sub> )	Referencia	Notas
China	N.A.	Transporte agregados, producción mezcla, transporte de mezcla, construcción	1. HMA	29 200	Peng, Cai, Yin, Li y Zhan (2015)	No incluye producción materia prima
Francia	De la cuna a la tierra	Producción materia prima, transporte materia prima, producción mezcla, construcción	1. HMA RAP 20%	18 889	Baptiste et al. (2016)	No toma en cuenta el transporte de la mezcla
			2. WMA RAP 20%	16 111		
			3. WMA con asfalto espumado RAP 20%	14 231		
Estados Unidos	De la cuna a la tierra	Producción materia prima, producción mezcla, transporte mezcla, construcción	1. HMA	44,2	Leng, Al-Qadi y Cao (2017)	Conversión unidad funcional, ver Cuadro XXI.*
			2. WMA	41,5		
Chile	De la cuna a la tierra	Producción materia prima, transporte materia prima y mezcla, producción mezcla, construcción	1. HMA	433,53	Arroyo et al. (2018)	Conversión unidad funcional, ver Cuadro XXI.*
			2. HMA NFU 10%	415,63		
Ecuador	De la cuna a la tierra+ Mant.	Producción materia prima, transporte materiales, equipo inicial, construcción, mantenimiento	1. HMA	1430	Rojas (2019)	Conversión unidad funcional, ver Cuadro XXI.*
			2. WMA PET 6%	1390		

Locación	Alcance	Etapas analizadas	Casos estudiados	Emisiones CO <sub>2</sub> e (kg/ton <sub>mezcla</sub> )	Referencia	Notas
Australia	De la cuna a la tierra	Producción materia prima, transporte materia prima, producción mezcla	1. HMA Cal	104,9	Tahmoorian, Bracken, Wheatley y Yeaman (2019)	Al RCA y vidrio reciclado se le atribuyen 0 kgCO <sub>2</sub> e.
			2. HMA Cal RCA <sup>8</sup> 25%	106,5		
			3. HMA Cal RCA 25% Vidrio 10%	103,9		
Francia	De la cuna a la tumba	Producción y transporte materia prima, producción mezcla, transporte de la mezcla, construcción, mantenimiento, rehabilitación y fin de la vida	1. HMA	174,2	Santos, et al. (2018)	Conversión unidad funcional, ver Cuadro XXI.* Estudian casos con diferentes porcentajes de caucho y EVA <sup>7</sup> .
			2. HMA 5% Caucho	142,6		
			3. HMA 5% Caucho Planta GLP	156,3		

<sup>1</sup> Pavimento asfáltico recuperado es conocido por sus siglas en inglés como RAP.

<sup>2</sup> Mezcla asfáltica en caliente es conocida por sus siglas en inglés como HMA

<sup>3</sup> Caucho procedente de neumáticos fuera de uso es conocido como NFU.

<sup>4</sup> Mezcla asfáltica semi-caliente es conocida por sus siglas en inglés como WMA

<sup>5</sup> Gas licuado de petróleo es conocido como GLP.

<sup>6</sup> Tejas asfálticas recuperadas son conocidas por sus siglas en inglés como RAS.

<sup>7</sup> Etilenvinilacetato es conocido por sus siglas como EVA.

<sup>8</sup> Agregado de cemento reciclado es conocido por sus siglas en inglés como RCA.

\*Se les aplicó conversión de unidad funcional, unificando los resultados a tonelada de mezcla asfáltica.



Con el objetivo de mitigar los impactos del cambio climático, ciertos investigadores han implementado diferentes materiales en las mezclas para producir pavimentos verdes, tal es el caso de Sampedro et al. (2012). En dicho estudio se analizó el efecto de agregar RAP y caucho de neumáticos reciclados (NFU) a una mezcla asfáltica caliente en distintas proporciones. La mayor huella de carbono del Cuadro XIX se encontró para el caso 1 con HMA sin modificar, el valor más bajo se reflejó con la opción 3 que utiliza un 70% de RAP (Cuadro XIX, fila 2). Debido a que el sistema se localiza en España, los datos para el asfalto provienen de refinerías europeas, al igual que el resto de los materiales, por lo que se identifican como las mayores causantes de la diferencia en emisiones equivalentes con respecto al presente estudio.

Asimismo, los resultados obtenidos por Van de Ven et al. (2012) evidencian una disminución en las emisiones al comparar una producción en caliente (HMA) a una tibia (WMA). Las huellas de carbono que obtuvo, correspondientes a 57,85 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub> y 44,50 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub> (Cuadro XIX, fila 3), son menores en relación con las obtenidas en el presente estudio, principalmente por diferencias en el tipo de combustible utilizado en producción, la temperatura de producción de mezclas asfáltica y la materia prima.

Con respecto a las diferencias identificadas para Van de Ven, se analiza primero el tipo de combustible, recordando que el GLP se caracteriza por emitir una menor cantidad de GEI que el diésel (Instituto Meteorológico Nacional, 2019). De esta manera, se genera menos dióxido de carbono equivalente al utilizar GLP para el caso de estudio localizado en Holanda, que con el diésel utilizado en Costa Rica. Aunado a este cambio, el ACV localizado en Holanda utiliza HMA y WMA, donde este último va a emitir menor emisiones por su menor requerimiento energético. La última diferencia identificada es la materia prima, ya que Van de Ven et al. sustituye un 50% de agregados por RAP, y no se toma en cuenta el transporte de la materia prima. Las emisiones de GEI con estos cambios van a variar notoriamente debido a que no se incluye toda una etapa del ciclo de vida, y el porcentaje de material

reciclado es muy alto, disminuyendo emisiones principalmente en la fase de producción de materia prima.

Para Estados Unidos, Mukherjee (2016) combina HMA con RAS y RAP en distintas proporciones, mostrando en el Cuadro XIX (fila 4) un mejor escenario en el caso 2 con HMA, 15% de RAP y 3% de RAS, mientras que el peor se identifica en el caso 1 constituido de HMA sin modificar. El hecho de que presente una huella de carbono menor a la del presente estudio, se le atribuye principalmente a la omisión de las emisiones correspondientes al transporte de la mezcla y la construcción de la vía. Asimismo, Mukherjee utiliza un alto porcentaje de materiales reciclado, como RAP y RAS, rondando desde 18% hasta 35%. Sin embargo, la presente investigación utiliza un máximo de 1% de material reciclado dentro de la mezcla asfáltica, generando una diferencia importante en las emisiones de GEI resultantes.

En China, Peng, et al. (2015) cuantificó una huella de carbono igual a 29 200 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub> (Cuadro XIX, fila 6), la cual es evidentemente mayor a las huellas de carbono obtenidas en los escenarios del presente estudio. Peng et al. determinó que la producción de la mezcla es la etapa con mayor generación de GEI debido al calentamiento del asfalto y de los agregados, lo cual implicaría que los factores de emisión para su materia energética son muy altos, ya sea utilizando el sistema eléctrico o combustible como fuente de energía. No obstante, esta investigación realizada en China no incluyó las emisiones generadas durante la producción de materia prima, y por medio de la presente investigación, se determinó que esta es la etapa más significativa y de las más analizadas dentro de los ACV. De esta manera, en caso de que se incluyera esta etapa dentro de la huella de carbono de Peng et al., sus emisiones se elevarían.

Los autores con las huellas de carbono más altas dentro del Cuadro XIX, son Baptiste et al. (2016) con un valores desde los 14 231 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub> hasta los 18 889 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub>

(fila 7), y de un orden similar a la de Peng et al. (2015) mencionada anteriormente. Baptiste et al. utiliza tecnologías avanzadas para cuantificar las emisiones liberadas midiéndolas directamente en la planta, e implementa materiales reciclados como RAP, junto con asfalto espumado. Estas modificaciones generan una disminución en el dióxido de carbono equivalente para su caso 3 del Cuadro XIX, donde la temperatura de producción disminuye a condiciones que la clasificarían la mezcla como WMA. Estos cambios implementados justifican una huella de carbono menor a la de Peng et al., el cual utiliza una HMA sin materiales reciclados.

Una situación similar a la presentada previamente ocurre para Estados Unidos (fila 8), donde Leng et al. (2017) determinó que las emisiones descienden en comparación con una HMA al utilizar la tecnología para producir WMA. Al compararse con el presente estudio, sus emisiones de GEI son menores, pero se atribuyen principalmente a los cambios de temperaturas en la producción.

Arroyo et al. (2018) implementó caucho en la mezcla asfáltica, generando una disminución de un 4% con respecto a una mezcla asfáltica caliente sin modificar, según se observa en el Cuadro XIX (fila 9). Dentro de las similitudes de este ACV con el de esta investigación se destaca el mismo alcance de la cuna a la tierra, y también utilizan material reciclado. Sin embargo, su huella de carbono para el caso 1 es alrededor de un 18% mayor a la del escenario 1 del presente ACV, donde una diferencia identificada es que Arroyo et al. analiza la fase de mantenimiento de la carretera, la cual no se analiza en el estudio actual y genera una fuente de emisión adicional.

Aunque el caucho es uno de los polímeros reutilizados más comunes en asfaltos verdes, existen investigaciones con otros tipos de material reciclado como el PET. Este es el caso en Ecuador, donde Rojas (2019) incorporó un 6% de PET agregado por vía húmeda a una WMA y obtuvo una reducción del 2,8% en la huella de carbono al compararla con la huella de

carbono de un HMA sin modificar, situación analizada en la sección 4.1.7. Según se observa la huella de carbono del caso 2 igual a 1390 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub> (Cuadro XIX, fila 10) supera la del escenario 2 de la presente investigación correspondiente a 354,25 kgCO<sub>2</sub>e/ton<sub>mezcla</sub>. A pesar de que utiliza el mismo agente modificante (PET reciclado), la diferencia es de un 75%.

El porcentaje de diferencia presentado entre la investigación de Rojas y el presente estudio, se relaciona principalmente a las condiciones de operación. En el caso de Rojas (2019), la producción de WMA se llevó a cabo a 130 °C. Por otro lado, para el escenario 2 (asfalto verde) de la presente investigación, la temperatura alcanzó los 162 °C, generando así emisiones desiguales entre ambos estudios al presentar consumos energéticos distintos. Además, sería de esperar una huella de carbono menor con una WMA, pero el estudio realizado en Ecuador toma en cuenta etapas como el mantenimiento y la identifica como una de las etapas más significativas en el aporte de emisiones de GEI de su ACV. Esta fase es la principal razón por la que su huella de carbono presenta valores elevados, pero aun así muestra disminuciones en el consumo energético entre el caso 1 (HMA) y el caso 2 (WMA con 6% de PET).

Aparte de las diferencias atribuidas a condiciones de proceso como cambios de temperatura, es muy común utilizar materiales modificadores. Tahmoorian et al. (2019) identifica la cal hidratada como uno de los materiales más comunes que puede sustituir agregados finos en las mezclas asfálticas. Para este estudio australiano, la menor huella de carbono resultó al utilizar cal hidrata, vidrio reciclado y RCA (mostrada en el Cuadro XIX, fila 12). Los resultados obtenidos son menores a los del caso actual de estudio, principalmente por una diferencia en las fases incluidas dentro de los límites de cada ACV. Tahmoorian et al. excluyó las emisiones generadas en el transporte de mezcla asfáltica y la construcción de la vía. De esta manera, es de esperarse que los resultados sean menores a los de la presente investigación, cuyos límites incluyen las etapas mencionadas.

Es importante resaltar que para todos los casos analizados anteriormente, incluido el caso de estudio de la presente investigación, se obtiene una disminución en las emisiones de GEI al implementar materiales reciclados dentro de la mezcla asfáltica. Caso contrario se observa para la investigación de Tahmoorian et al. (2019), donde la mayor huella de carbono se obtuvo para el caso con un 25% de agregados de cemento reciclado (RCA), asegurando que se debió a la mayor cantidad de asfalto requerido según el diseño de mezcla. Sin embargo, al agregar el RCA, junto con vidrio reciclado, sí se obtuvo una reducción en la huella de carbono, conteniendo una menor masa de bitumen que el caso anterior. Los resultados de este ACV son menores a los del presente estudio, principalmente por los altos porcentajes de material reciclado (25% y 35%) dentro de la mezcla, comparado con el porcentaje de PET utilizado (1%) en el escenario 2. Aunado a esto, Tahmoorian et al. tomó un valor de  $0 \text{ kgCO}_2\text{e/ton}_{\text{mezcla}}$  para el RCA y el vidrio reciclado. Dicha suposición no es correcta, ya que estos materiales se deben reprocesar y transportar, lo cual conlleva un consumo energético con emisiones de GEI asociadas.

Por último, la investigación realizada por Santos et al. (2018) es de suma importancia ya que estudia la incorporación de EVA dentro de la mezcla asfáltica, el cual corresponde a uno de los polímeros utilizados en el escenario 3 del presente estudio. La huella de carbono de ese caso con EVA, no se muestra en los resultados del Cuadro XIX (fila 13), ya que los autores solamente registran los valores del mejor escenario (HMA modificado con 5% de caucho). Los tres casos observados del Cuadro XIX del estudio realizado en Francia, evidencian menores emisiones de GEI comparado con las de la presente investigación. Esta diferencia se puede deber a un cambio de combustible en la producción por parte de Santos et al., pasando de búnker a gas natural. Al aplicar este cambio se presentaron disminuciones en la huella de hasta un 11% para todos los casos estudiados, mostrando así una buena opción para las empresas que desean aplicar este tipo de cambios y disminuir gastos.

Aunque los datos de huella de carbono del caso 3 son menores a los obtenidos en el escenario 3 de esta investigación actual, no se pueden comparar directamente ya que se utilizó una mezcla de 1,2% de Elvaloy con 0,2% de PPA y Santos et al. (2018) agregó 5% de EVA.

Como se mencionó anteriormente, Santos et al. (2018) determinó el escenario con 5% de EVA como el peor escenario en términos ambientales, concordando con las conclusiones de este proyecto. Aparte de la huella de carbono analizó otras 14 categorías de impacto. De estas otras categorías evaluadas, el escenario con 5% de EVA fue la peor opción en 12 de ellas. Por esta razón, en aras de mitigar los efectos del cambio climático, esta modificación no es recomendable dentro de los límites del estudio de Santos. Dichas conclusiones se alinean con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde se utiliza el polímero Elvaloy (EVA) en conjunto con el PPA en el escenario 3.1, el cual también se señaló como el escenario con las mayores emisiones GEI. Sin embargo, debido a esta situación, se recomienda un análisis de sensibilidad para verificar si existe un punto donde la mezcla de Elvaloy y PPA sea beneficiosa, tanto en términos de desempeño del producto como en el ámbito ambiental.

Las diferencias señaladas durante esta sección se repiten en una gran cantidad de investigaciones, presentando así oportunidades de mejora e innovación en el área de construcción de vías. No se debe dejar de lado la zona geográfica a la que aplica cada ACV, ni la evaluación de los impactos generados según las modificaciones implementadas en el producto final.

#### **4.3. Alternativas y consideraciones aplicadas al caso de estudio para la mitigación del cambio climático**

Por medio de los resultados descritos en las secciones anteriores, se resalta el escenario 2 (asfalto verde) como una buena opción para dar un segundo uso a materiales de desecho,

en donde disminuyen las emisiones de GEI comparado con el escenario 1 (asfalto convencional). Asimismo, existen otras alternativas y consideraciones de materiales, procedimientos o propiedades, que pueden proporcionar menores huellas de carbono para el producto en estudio.

#### **4.3.1. Materiales alternativos en mezclas asfálticas**

La incorporación de RAP (pavimento de asfalto modificado) disminuye la huella de carbono atribuida a una mezcla asfáltica o carretera pavimentada. El decrecimiento de estos valores reside en dos cambios principales. Primero la reutilización de un material que ya estaba destinado para desecho, por lo que no culmina como contaminación adicional de suelos, fuentes acuíferas, entre otros. El segundo punto se refiere a la sustitución de un porcentaje significativo de agregados por el RAP, generando así una disminución en las emisiones por la utilización de una menor cantidad de materia prima de origen pétreo.

Según Sampedro et al. (2012), cuando se adiciona RAP a la mezcla se toman en cuenta las emisiones de GEI atribuidas a su tratamiento y manipulación en la planta de producción, y no las emisiones correspondientes a su extracción y tratamiento. Estas últimas actividades mencionadas se incluyen en las emisiones concernientes a la vía de donde se extrajo el RAP. Según se especificó en la sección 1.4.2, es necesario tener un balance con el porcentaje de RAP utilizado, ya que si son valores muy altos, el consumo energético aumenta sustancialmente. Por esta razón, una buena opción de estudio es investigar la adición de RAP, ya sea solo o en conjunto con PET reciclado, en mezclas asfálticas.

Esta iniciativa también se respalda por la ley 9828: Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial puesta en vigencia a partir del 21 de junio del 2020 para Costa Rica (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2020). La ley indica la obligatoriedad de utilizar al menos un 50% de materiales reciclados en las obras de infraestructura vial, ya sea para construcción, reconstrucción, mantenimiento,

conservación o rehabilitación (Bravo, 2020). De esta forma la aplicación de RAP y PET reciclado en las mezclas asfálticas continúa siendo una buena opción para cumplir con la ley señalada, aunado a los beneficios obtenidos para mitigar el cambio climático.

Esta misma ley establece que el LanammeUCR es el laboratorio encargado de generar las especificaciones técnicas para la implementación de estos tipos de materiales (Bravo, 2020). Aunque el laboratorio se encuentra en proceso de realizar ensayos, diseñar el material y elaborar dichas especificaciones, no es la primera vez que estudian este tipo de implementaciones. Leiva y Vargas (2017) realizaron un estudio en el LanammeUCR para proveer una guía sobre el uso efectivo del RAP para pavimentos en Costa Rica, dentro del cual identificaron las mejores prácticas de diseño, producción, evaluación y colocación del producto. Asimismo, sugirieron revisiones de las especificaciones costarricenses sobre construcción de carreteras y una guía para implementar este material reciclado en las mezclas asfálticas.

Con el fin de agregar material reciclado en mezclas asfálticas, se puede resaltar el proceso estudiado en la investigación actual sobre la incorporación de PET reciclado. En este caso, a partir del diseño de mezcla se determinó un porcentaje de 1% de plástico sobre la masa de los agregados (Monturiol, 2019).

No obstante, algunos autores utilizan valores más altos para adicionarlo por método seco. Rojas (2019) sustituye un 6% de la masa de los agregados por PET reciclado, mientras que Widojoko y Purnamasari (2012) concluyen que agregar entre 1% y 4% de PET mejora las propiedades de cohesión y adherencia de la mezcla asfáltica. Por estas razones, aunque se haya implementado 1% de PET reciclado en el producto final, se insta a utilizar mayores porcentajes de PET y, comparar tanto el desempeño del material como los beneficios ambientales que se podrían obtener.



Otros polímeros reciclados han sido investigados en el LanammeUCR, lo cual amplía las posibilidades para implementar este tipo de materiales en las mezclas asfálticas del país. Uno de ellos se obtiene a partir de tubos de cloruro de polivinilo (conocido como PVC, por sus siglas en inglés). El porcentaje seleccionado es de 0,1% añadido por una vía seca (Corella, 2019), resultando una mezcla asfáltica que cumple con las regulaciones costarricenses y permite la reutilización de este material poco reciclable. Igualmente, se ha investigado la modificación con polietileno de baja densidad (LDPE por sus siglas en inglés) obtenido de bolsas plásticas y en forma de pellets, sustituyendo un 1% de los agregados en la mezcla asfáltica (Gutiérrez, 2019).

Igualmente, otros materiales reciclados más innovadores como los parachoques de vehículos (bumper) y polipropileno en fibras fueron utilizados para modificar el ligante asfáltico. Las condiciones apropiadas se obtuvieron con un 2% de bumper y con un 1,5% de polipropileno (Aguilar, Leiva, Loría, Villegas, & Navas, 2015). Asimismo, se encuentra en estudio por parte del LanammeUCR modificaciones con arena sintéticas de materiales reciclados y HDPE. El estudio de la incorporación de materiales como caucho de neumáticos y poliestireno de envases plástico invita a nuevas investigaciones.

Aunque en la industria se aplican modificaciones con polímeros producidos para este fin, en esta sección no se evalúan, ya que se desea aprovechar materiales que van a ser desechados. De esta manera, se espera disminuir la contaminación que producen, y a la misma vez mitigar las emisiones de GEI. Aunado a esto, si se utilizan materiales reciclados como modificadores, se reduciría el impacto generado por la producción de polímeros modificadores convencionales, y un buen tema de estudio sería evaluar el impacto generado debido a la situación descrita anteriormente.

A partir de la comparación de varias investigaciones en la sección 4.2, se pueden resaltar ciertos materiales o mezcla de ellos. Uno de los más comunes es con neumáticos fuera de

uso, los cuales se agregan por una vía húmeda y comúnmente corresponde al 10% de la masa del ligante (Calahorra, Giménez, Herrera, Martínez, & Salazar, 2016). De la misma forma, se estudian casos donde se incorpora al mismo tiempo RAP y caucho de neumáticos a las mezclas, o también RAP con vidrio reciclado.

Aparte del conocido RAP, se puede incorporar RAS, compuesto de tejas asfálticas recuperadas o RCA correspondiente al agregado de cemento reciclado. La variedad de opciones de materiales para agregar es grande, aunado a esto las mezclas entre ellos también son una posibilidad. De esta manera, se pueden realizar ensayos probando las mezclas mencionadas anteriormente o nuevas con la materia prima de Costa Rica para ver cuáles se podrían implementar en la construcción de vías.

#### **4.3.2. Cambios dentro del ciclo de vida de mezclas asfálticas para disminuir las emisiones de GEI**

Aparte de los cambios en la materia prima para producir mezclas, es posible innovar en los procesos de manufactura, ya sea cambiando condiciones de operación, fuentes de energía, locación de las facilidades. Algunas de las opciones más relevantes se van a detallar seguidamente.

Dentro de estos posibles cambios en las condiciones de operación se encuentra el cambio en la temperatura de producción, donde la energía requerida también decrecería y, por ende, las emisiones de GEI. Una opción que permite utilizar temperaturas menores en la producción es al agregar asfalto espumado. Este material aumenta el volumen del bitumen y provoca un efecto lubricante. Se ha demostrado que a temperatura ambiente o cercanas a los 100 °C, se puede realizar la mezcla entre los agregados y el asfalto espumado (Van de Ven, Jenkins, & Van den Beemt, 2012; Ulloa, 2011). Es importante tomar en cuenta el tipo de materiales que se estén utilizando, ya que materiales como RAP o asfalto modificados

con polímeros, presentan temperaturas establecidas a las que se deben mantener (Mukherjee, 2016).

Las mezclas asfálticas tibias representan un grupo de tecnología que permite operar con temperaturas más bajas a las habituales, con reducciones mínimas de 28 °C para poder colocarse en esta categoría (Reyes & Rondón, 2015). De esta manera, es posible obtener disminuciones en la energía requerida y así también en las emisiones generadas. Aunque la cantidad de GEI generados varía según factores geográficos, tipo producción utilizada, estado de los equipos, y otros; es posible detectar valores menores en la huella de carbono con el cambio a esta tecnología (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018).

Por ejemplo, se han contabilizado reducciones entre el 30% al 40% en dióxido de carbono y dióxido de azufre, alrededor del 50% de los hidrocarburos volátiles, también cercanas al 10% de monóxido de carbono y, entre el 60% en los óxidos de nitrógeno (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). Las disminuciones no se cuantifican únicamente con respecto a emisiones de GEI, se han evidenciado reducciones de hasta 29% en los impactos debido a la acidificación, alrededor del 25% para el impacto relacionado a la formación de foto-oxidantes, entre otros (Mazumder, Sriraman, Kim, & Lee, 2016).

Otra de las ventajas que presenta una WMA, es un menor tiempo de compactación del material en la construcción de la carretera comparado con una HMA. En esta etapa de construcción se requiere de rodillos que no vibren, solamente con rodillos estáticos se puede realizar la operación. Además, este equipo debe pasar sobre la sección menos veces, ya que el material presenta las condiciones de compactación esperadas en un tiempo menor (Van de Ven, Jenkins, & Van den Beemt, 2012). Este tipo de mezclas requieren aditivos que facilitan el manejo de los materiales a temperaturas más bajas. Una alternativa de aditivos es el agua, la cual se puede inyectar al asfalto por medio de inyectoras (Leng, Al-Qadi, & Cao, 2017).

Estos cambios de temperatura dentro del proceso de producción se pueden aplicar al asfalto verde con PET reciclado. Dicho material se puede añadir al a temperaturas cercanas a los 130 °C según Rojas (2019), por lo que el beneficio ambiental podría mejorar implementando ambos cambios, la disminución de temperatura y la implementación del material reciclado dentro de la mezcla asfáltica. Sin embargo, esto no aplica para todos los polímeros modificantes. Por tal razón, antes de realizar un cambio de este tipo, se debe estudiar el proceso y los materiales involucrados, donde las condiciones de operación funcionen para el procesamiento de la materia prima.

Otra opción existente para reducir el consumo energético es la utilización de un sistema de cogeneración donde se aproveche el calor excedente generado por el calentamiento de los agregados. Al implementar este tipo de tecnología, se mejoraría la eficiencia energética y, por ende, la disminución en las emisiones de CO<sub>2e</sub> (Sampedro, Del Val, Gallego, Querol, & Del Pozo, 2012).

Además, existen pequeños cambios en los procesos que se pueden aplicar en aras de mitigar el cambio climático. Uno de ellos es la elección de productores locales para conseguir los materiales pétreos. Principalmente si se producen con electricidad, la matriz energética de Costa Rica es más del 98% renovable, lo cual ayuda con la disminución de emisiones de GEI.

Por otro lado, los agregados se producen en todo el país, así que comprar el material al quebrador más cercano con respecto a la planta productora de mezcla ayudaría en la reducción de emisiones atribuidas al transporte de este material. La importancia radica en que los agregados representan al menos el 90% del volumen de la mezcla asfáltica, razón por la cual una reducción en las distancias transportadas genera beneficios ambientales y económicos.

Una limitación en el proceso de producción de mezclas asfálticas se puede deber al porcentaje de humedad presente en los agregados. Esto debido que a mayor humedad en el material se requiere más tiempo de secado y, por ende, mayor cantidad de combustible consumido (Sampedro, Del Val, Gallego, Querol, & Del Pozo, 2012). Esta humedad se puede deber al tiempo que transcurrió desde la extracción del material hasta el momento de utilización, las condiciones ambientales y tipo de almacenamiento, propiedades de los materiales pétreos, entre otros. Algunas de las medidas que se pueden tomar sin incurrir en altos consumos energéticos, es proveer un almacenamiento techado o expuestos al sol, preferiblemente en ambientes no tan húmedos.

Igualmente, el transporte del asfalto en Costa Rica se lleva a cabo por vía marítima, y es una de las actividades con gran impacto en la huella de carbono del asfalto. Por esta razón, entre menor sea la distancia transportada, menor será el impacto en la emisión de dióxido de carbono equivalente. Una buena práctica según este escenario descrito sería importar asfalto de un país cercano y evaluar los métodos de refinamiento del petróleo, sin olvidar cumplir con la legislación del país.

Las emisiones debidas al transporte de la mezcla asfáltica al sitio de construcción también pueden eliminarse si la mezcla se produce en el mismo lugar donde se va a colocar. Dependiendo del tamaño de la vía esta opción es factible gracias a plantas de mezclas asfálticas móviles, las cuales pueden trasladarse a cualquier zona donde sean requeridas, siempre dentro del marco legal permitido en el país y analizando costos.

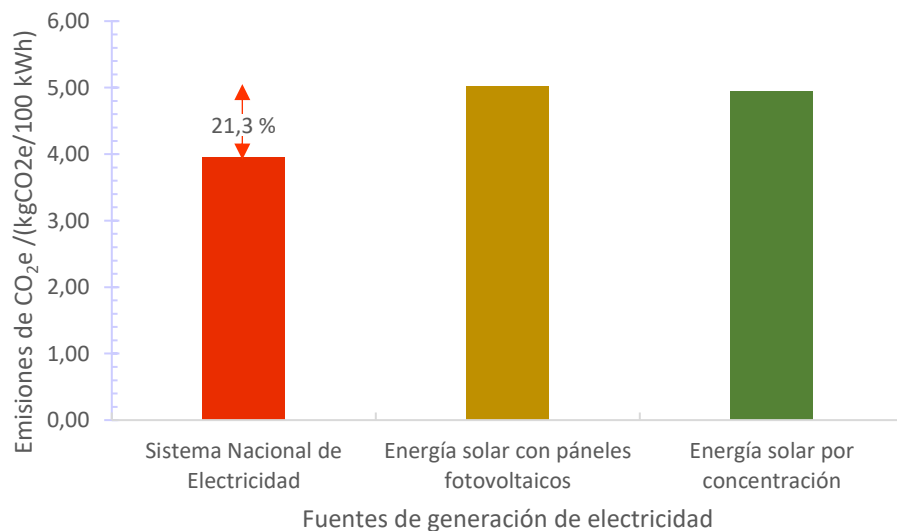
Es posible implementar cambios del combustible utilizado en las plantas de modificación de asfalto y producción de mezcla asfáltica. Las emisiones generadas según el tipo de combustible dependen de los factores de emisión, y a su vez, estos varían según el país donde se extrajo el petróleo, el proceso de refinamiento que se realizó y el país donde se utilice. Para el caso de Costa Rica, es posible valorar la cantidad de emisiones según los

factores de emisión presentados en la base de datos de la herramienta. Según el Instituto Meteorológico Nacional (2019) la cantidad de emisiones de GEI liberadas según el tipo de combustible en orden descendente es la siguiente: gasóleo, búnker, diésel, gasolina y gas licuado de petróleo (GLP). Aunque este orden es específico para Costa Rica, el resto de países muestra un comportamiento similar.

Un ejemplo de que estos cambios se pueden aplicar lo muestra Santos et al. (2018) al cambiar el combustible de búnker a GLP. Si este cambio se aplicara a un proceso realizado en Costa Rica, se esperaría una reducción en la huella de carbono debido a que el búnker es uno de los combustibles más contaminantes, mientras que el GLP es uno de los que generan menos emisiones. En los tres casos analizados de la presente investigación se utiliza gasóleo para el quemador en la planta de producción y, diésel para el calentamiento del ligante al igual que en los equipos propios de producción. De esta manera, se podría optar por un quemador, planta de mezcla y tanque de calentamiento que funcionen con LPG o gasolina para reducir las emisiones. No obstante, es imperante estudiar la cantidad de combustible requerido en cada operación para compensar las emisiones.

Otra alternativa es utilizar electricidad en la producción de mezclas, aunque también se deben valorar los costos económicos, detalle que se discute más adelante. Sin embargo, hay procesos que utilizan la electricidad como fuente eléctrica, por ejemplo, la trituración de botellas de PET recicladas por parte de la empresa reprocesadora del plástico. Muchas empresas con conciencia ambiental intentan innovar en la utilización de energías renovables, pero se debe tomar en cuenta los factores de emisión relacionados a cada fuente de energía. Esta empresa implementó paneles fotovoltaicos en la planta para la trituración del material reciclado y preparación de otros materiales como la arena sintética de plásticos reciclados.

El análisis mencionado sobre los factores de emisión se realiza por medio de la Figura 30. Comparación de las emisiones de dióxido de *carbono equivalente* para diferentes fuentes de generación de electricidad, la cual muestra la cantidad de dióxido de carbono equivalente por 100 kWh consumidos. La diferencia entre utilizar energía solar producida con paneles fotovoltaicos contra tecnología por concentración, implica una diferencia de apenas 1,4%, siendo el mejor caso la energía solar por concentración.



**Figura 30.** Comparación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente para diferentes fuentes de generación de electricidad (Kommalapati, Kadiyala, Shahriar, & Huque, 2017; Instituto Meteorológico Nacional, 2019)

Por el contrario, una mayor diferencia se nota para producir la electricidad a partir del Sistema Nacional de Electricidad con respecto a la energía solar, obteniéndose un porcentaje de diferencia del 21,3%. En el caso de Costa Rica, la matriz energética está generada con más del 98% de fuentes renovable (Castro, 2019), situación que beneficia el uso de la electricidad generada en el país como fuente de energía sobre la energía solar.

Las emisiones de GEI debidas a la energía solar se deben alrededor de un 70% al cultivo y fabricación de los paneles, ya que pueden construirse con muchas materias primas distintas

como silicón cristalino, silicio monocristalino, silicio policristalino, telururo de cadmio y muchos otros más. Además, el reciclaje al final de su vida útil no es muy sencillo según el tipo de material, por lo que especialistas deben encargarse de su desecho (Nugent & Sovacool, 2014). De esta forma, para esas empresas que igualmente utilizan electricidad en las operaciones de producción, se recomienda analizar el costo y el beneficio ambiental, para valorar si es ventajoso utilizar fuentes de energía solar.

Asimismo, la selección de un método seco para agregar el PET reciclado o cualquier plástico reciclado es ventajoso en cuanto a la disminución de efectos negativos debidos a la emisión de GEI. Aunque este proceso fue seleccionado por parte del LanammeUCR, cabe resaltar que permite utilizar una mayor cantidad de plástico reciclado dentro de la mezcla. En las mezclas asfálticas entre el 90% y 96% puede ser de agregados pétreos, mientras que el porcentaje restante corresponde al ligante asfáltico (Reyes & Rondón, Pavimentos: Materiales, construcción y diseño, 2015). Por tanto, el hecho de seleccionar una vía seca ayuda en un mejor aprovechamiento de material reciclado, que de otra forma hubiera terminado como desecho.

#### **4.3.3. Aspectos económicos debidos a cambio de materiales u operaciones**

Con respecto al área económica, usualmente el costo de los materiales representa alrededor del 70% de los costos totales de la producción de mezcla asfáltica, en donde el ligante asfáltico resulta ser el de mayor costo (Leiva & Vargas, 2017; Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). Al sustituir una parte de los materiales vírgenes con otros que sean reciclados, promueve la obtención de beneficios económicos, ya que este tipo de materia prima reciclada no se le atribuye un precio alto porque iban a ser desechados.

El PET reciclado es incluido dentro de las mezclas asfálticas producidas para este estudio, por lo que se recomienda analizar el ahorro generado por su utilización. Se esperaría una disminución en costos, atribuidos a la reducción en la cantidad de asfalto y agregados según



el diseño de la mezcla. Sin embargo, es importante corroborar si esos ahorros compensan los gastos incurridos para el transporte y reprocesamiento del PET reciclado. Con el objetivo de abaratar los costos de producción utilizando plásticos reciclados, se presenta como una buena alternativa omitir procesos de esterilizado o lavado profundo.

Otro tipo de ahorro que se podría considerar es la inclusión de RAP en las mezclas, donde se reducen los costos asociados a la adquisición y el transporte de materia prima. Condiciones como el contenido de RAP incorporado, la humedad del material y la temperatura de producción podrían generar variaciones en los gastos. Lo cual se asevera por medio de una investigación de Leiva y Vargas (2014), mostrando que es posible obtener ahorros de hasta un 34% para mezclas con un contenido de hasta 50% de RAP.

En general, los materiales reciclados van a representar ahorros en la adquisición de materia prima, ya que no se debe asumir el gasto que implicaría la compra de un material recién producido. Como se ha visto, es posible que lleven reprocesos, pero normalmente su ahorro económico compensa esta inversión. Por ejemplo, Arroyo et al. (2018) menciona que al utilizar caucho reciclado como agente modificador, se obtienen ahorros por la sustitución de ligante, el aumento de la vida útil de la construcción y la reducción del mantenimiento.

Tahmoorian et al. (2019) afirma que al implementar RCA y vidrio reciclado dentro del material para construir la capa asfáltica de una vía, permite obtener ahorros significativos debido a reducciones en el consumo de agua y energía. Igualmente, Schlegel et al. (2016) indica que, al implementar cal hidratada en las mezclas, es posible reducir el consumo energético cerca de un 30%, induciendo a ahorros en producción, al igual que reducciones atribuidas a menores procedimientos de mantenimiento. Misma situación se presenta con una amplia gama de materiales reciclados y estudiados para modificar mezclas asfálticas como PVC, PE, PP, PS, entre otros.

Asimismo, se han estudiado dos procesos diferentes para la incorporación de polímeros a la mezcla, ya sea por vía seca o por vía húmeda. Aunque la cantidad de materia utilizada en un proceso húmedo es menor, por lo general involucra procesos previos con altas temperaturas, lo cual aumenta los costos de producción (Corella, 2019).

Por este motivo, se seleccionan las vías secas de modificación en la mayoría de las ocasiones, las cuales normalmente requieren temperaturas más bajas de producción con respecto a una vía húmeda. Se debe tener cuidado en que la elección del método no se base solamente en el factor mencionado anteriormente, ya que según la materia prima y la zona geográfica podría variar, por lo que una buena práctica sería realizar el estudio de costos con valores cuantitativos.

Para el caso específico de modificación de asfalto con PET, se estudió también por medio de un método húmedo donde se implementa una trituración adicional para reducir todavía más el tamaño de las partículas y así proporcionar una mezcla más homogénea entre el ligante y el polímero. Aparte de la molienda, se requirió de un mezclado a 185 °C por al menos dos horas y media (Monturiol, 2019). Dichas operaciones mencionadas anteriormente elevan el consumo energético y en costos, por lo que no es la mejor opción en cuanto a mitigación de emisiones de GEI ni para ahorros económicos, confirmando así como mejor elección una modificación vía seca.

Se han discutido las ventajas al reducir las temperaturas para las mezclas asfálticas tibias, ya que presentan una disminución en las emisiones. Por su parte, la posibilidad de reducir las temperaturas dentro del proceso de producción de mezclas asfálticas conlleva a gastos en la modificación de equipos, aditivos para la mezcla, pero a la misma vez un ahorro en el consumo de combustible durante la obtención de materiales y producción de la mezcla. En caso de que se requieran aditivos, la escogencia del agua beneficia el sector de los costos. Además, es importante considerar que estos cambios en el proceso no se pueden aplicar a

todos los materiales disponibles, por lo que es importante estudiar si este tipo de cambio es factible para el sistema en estudio (Leng, Al-Qadi, & Cao, 2017).

Dependiendo de la zona geográfica donde se procese el producto, las propiedades de los materiales y los equipos, es posible obtener ahorros en costos entre el 11% y el 35% al producir WMA (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). Estos resultados colocan a las WMA como una alternativa atractiva para los empresarios desde el ámbito económico, mostrando una ventaja frente a las mezclas asfálticas calientes. Aunque existen otros tipos de mezclas con temperaturas más bajas como las templadas o las frías, la WMA es la más estudiada y utilizada globalmente, ya que no requiere cambios drásticos en equipo ni proceso, pero con resultados positivos.

La utilización de asfalto espumado en mezclas asfálticas es doblemente beneficioso en cuanto a ahorros económicos. Primeramente, las temperaturas de mezclado bajas, desde los 25 °C, generando ahorros en consumo energético (Van de Ven, Jenkins, & Van den Beemt, 2012; Ulloa, 2011). Además, la emulsión asfáltica es ₡ 59,49 (\$ 0,1) más barata por litro que el asfalto AC-30 según los precios de RECOPE (2020). Se deben comparar con los cambios en equipos, los aditivos requeridos, para verificar sus ventajas sobre el producto final. Otra opción posible relacionada al área energética es la utilización de un sistema de cogeneración aprovechando el calor excedente producido por el calentamiento de los agregados. Este tipo de sistemas podrían reducir los costos de operación en la planta.

Dentro de las recomendaciones para generar ahorro en la construcción de vía, destaca la compra de la materia prima a productores locales que se encuentren en zonas cercanas a donde se lleva a cabo la producción de la mezcla asfáltica. Para el caso de Costa Rica aplica principalmente a los agregados pétreos, lo cuales se producen a lo largo del país. Se puede localizar el quebrador de piedra más cercano a la planta de mezcla para disminuir los costos en términos de transporte.

Como se ha descrito, el cambio de combustible en la producción es valorado como alternativa para mitigar el cambio climático. Sin embargo, no se debe dejar de lado la parte económica. Los precios vigentes al 27 de mayo de 2020 para los diferentes tipos de combustibles en las terminales de venta de RECOPE se observan en el Cuadro XX.

**Cuadro XX.** Precio por litro dados por RECOPE para los diferentes tipos de combustibles (RECOPE, 2020)

<b>Tipo de combustible</b>	<b>Precio por litro /(¢/L<sub>combustible</sub>)</b>	<b>Precio por litro /(\$/L<sub>combustible</sub>)</b>
Búnker C	93,44	0,16
GLP	111,54	0,19
Gasóleo	166,77	0,29
Diésel 50	295,25	0,51
Gasolina Plus 91 (regular)	492,18	0,85
Gasolina Super (superior)	517,22	0,89

Primeramente, se debe cuantificar los litros de cada combustible por utilizar, para proceder con el análisis de costos. Sin embargo, como un primer alcance, las opciones de búnker y GLP son las más baratas, lo cual ayudaría en disminución de gastos por producción. Debido a que el GLP emite menos GEI, según los factores de emisión presentados del Instituto Meteorológico Nacional (2019), sería la mejor elección en el caso de que desee implementar un cambio de fuente energética.

Si bien el Sistema Nacional Eléctrico como fuente energética se presenta como una buena opción para mejorar el perfil ambiental del producto, la idea no resulta atractiva económicamente debido a que los costos de producción se elevarían. Si se produjeran grandes cantidades de mezcla asfáltica no sería rentable, pero se podría estudiar su aplicación en proyectos con dimensiones más pequeñas.

Otra opción utilizada en empresas costarricenses en el uso de paneles solares para la generación de electricidad utilizada en la producción. El costo inicial se eleva

sustancialmente al comprar este tipo de tecnología, de instalación, espacio físico para colocarlo, baterías para almacenar energía. Sin embargo, en muchos casos se ha percibido un ahorro en la factura eléctrica con el paso de los años. Esto varía según la zona geográfica donde se encuentre la planta, la radiación que se reciba en el lugar, la potencia del equipo y las leyes energéticas de cada país, pero se puede analizar como una opción de ahorro, sin dejar de lado los efectos ambientales que podrían generar.

Cabe resaltar que las alternativas de ahorro mencionadas en esta sección toman en cuenta aspectos generales a partir de los procesos estudiados o cambios realizados por parte de otros investigadores alrededor del mundo. Se recomienda realizar estudios económicos detallados donde se analicen costos aplicados al contexto nacional para obtener conclusiones en términos numéricos y verificar que los beneficios económicos se ajusten al mejoramiento del perfil ambiental.

#### **4.3.4. Consideraciones relacionadas al desempeño de las mezclas asfálticas modificadas**

Existen muchas posibilidades para la modificación de mezclas asfálticas, pero es importante analizar la mejora en las propiedades del producto y en la vida útil, ya que no tendría sentido implementar materiales que no sean beneficiosos en términos de desempeño.

Los estudios realizados en el LanammeUCR mencionan que el producto final presenta mejoras en el desempeño global al incorporar 1% de PET reciclado en mezclas asfálticas por una vía seca. Específicamente, los resultados para el daño por humedad, la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la fatiga otorgan resultados favorables al compararse con una mezcla control y otra modificada por un método húmedo. Además, presenta una mayor rigidez, proporcionándole una mayor capacidad para resistir el número de ciclos de carga (Monturiol, 2019). Otros autores confirman mejoras en la estabilidad de las mezclas utilizando porcentajes menor al 6% de PET reciclado (Rojas N. E., 2019).

Con respecto a los otros casos estudiados más profundamente por el LanammeUCR, la incorporación de PVC mantiene el buen desempeño de la mezcla, por lo que igual puede funcionar como sustituto del agregado y utilizarse en rutas con volumen de tránsito mediano (Corella, 2019). Por otro lado, al agregar LDPE, los resultados de desempeño no muestran mejoras significativas con respecto a la mezcla sin modificantes, pero tampoco disminuyen las propiedades, por lo que igualmente se podría aplicar a la construcción de vías (Gutiérrez, 2019).

Otros materiales también han sido investigados, como parachoques de vehículos, los cuales contienen mezclas de policarbonato, poliéster, polipropileno con fibras de vidrios, poliuretano, entre otros. A partir de las condiciones ensayadas, se determinó que esta mezcla asfáltica se puede aplicar en vías con tránsito medio, la rigidez aumenta por la modificación con polímeros, aunque se limita a zonas de baja precipitación para evitar posibles daños debido a la humedad. Asimismo, se aplicó polipropileno (PP) recolectado como fibras a mezclas asfálticas, resultando mejoras en el daño por humedad y una alta capacidad de respuesta ante cargas altas (Aguar, Leiva, Loría, Villegas, & Navas, 2015).

El hecho de que los diferentes tipos de plásticos reciclados mencionados anteriormente hayan sido investigados en el LanammeUCR, asegura que se pueden utilizar con la materia prima disponible en Costa Rica. Sin embargo, una posibilidad sería estudiar una amplia gama de polímeros reciclados para clasificarlos en términos de desempeño y vida utilizando los materiales accesibles en el país. Actualmente se están investigando modificaciones con polietileno de alta densidad (HDPE), y con arena sintética. Se podrían realizar comparaciones también con caucho de neumáticos y poliestireno de envases para comida, los cuales presentan mejoras similares al utilizar PP (Fjóla, 2018).

Con el objetivo de mostrar resultados que abarquen varios ámbitos, se recomienda realizar un análisis costo-beneficio sobre el uso de polímero reciclado en carreteras, lo cual

proporcionaría mayores razones para justificar en la elección de un proceso y polímero específico. De esta manera se puede integrar el área de costos, desempeño y beneficios ambientales.

#### **4.3.5. Alternativas para la cuantificación de los efectos generados por la mezcla asfáltica sobre el cambio climático**

Según la ISO 14067, se utiliza la huella de carbono como único indicador de impacto ambiental en un análisis de ciclo de vida. Sin embargo, esta norma se basa en la ISO 14040, la cual menciona la posibilidad de utilizar una amplia gama de indicadores. Cuando se utilizan varias categorías de impacto, se deben normalizar para asignar un peso a cada una según su importancia (International Standard Organization, 2006).

Se han determinado las áreas más relevantes para los impactos generados en un ACV. Algunos de los indicadores estudiados en estos estudios son el potencial de calentamiento global, la acidificación, el agotamiento de la capa de ozono, la eutrofización, la contaminación del aire, la radiación ionizante, el smog fotoquímico, la contaminación química, el uso de agua dulce, el uso del suelo, los cambios en la integridad de la biosfera, la toxicidad humana (efectos cancerígenos y no cancerígenos), entre otros (Dong & Hauschild, 2017). Este tipo de indicadores se pueden calcular en programas especializados como Simapro o GaBi.

Aunque la huella de carbono describe muy bien el comportamiento ambiental de un producto, es posible utilizar más indicadores para un análisis integral. Al comparar productos, existe la posibilidad de que un indicador presente mejor desempeño ambiental que otro, y por esto a los resultados se les otorga un peso según su importancia. Una muy buena opción para aplicar al caso de estudio es cuantificar la huella hídrica. Este indicador mide la cantidad de agua requerida para producir un bien o servicio. La recopilación de

información para el inventario no es tan difícil si las empresas llevan un registro del agua utilizada para cada proceso (Europe Now, 2018).

Según Johansson (2018) otro de los posibles indicadores utilizados en ACV de mezclas asfálticas es el potencial de agotamiento de los recursos fósiles donde se mapea el uso de los mismos. Se encuentra dentro de los indicadores que proveen información sobre la categoría de impacto de cambio climático, ya que la combustión de estos materiales es una gran contribuidora a las emisiones de GEI. Al igual que la huella de carbono, se debe cuantificar el volumen de combustible utilizado en los procesos, por lo que es una buena idea agregarlo para obtener información adicional.

La acidificación terrestre es causada principalmente por el amoníaco, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Estudios reportan el uso de combustible y bitumen como la principal causante de este tipo de acidificación en los ACV de mezclas asfálticas (Johansson, 2018). Por medio de estos indicadores se puede corroborar las etapas que más afectan el perfil ambiental de un producto, o mostrar el comportamiento contrario según cada resultado.

Por estas situaciones expuestas, se recomienda seleccionar indicadores alineados al objetivo del ACV y aplicarlos a casos de estudios similares, donde se utilicen asfaltos convencionales, asfaltos verdes o asfaltos modificados. Se recomienda realizar una estrategia de recopilación de información desde el inicio para recolectar todos los datos necesarios en el inventario de manera adecuada y oportuna.





## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La presente investigación se ha enfocado en el punto 13 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, relacionado al cambio climático (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018), partiendo del hecho que al disminuir las emisiones de GEI se está realizando un aporte a la mitigación del cambio climático. A continuación se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este proyecto, para poder cumplir con la finalidad menciona y proveer diferentes opciones al público meta.

### **Conclusiones**

En este estudio se evaluó la huella de carbono del asfalto verde, asfalto modificado y asfalto convencional en Costa Rica, a través de un análisis de ciclo de vida. A partir del desarrollo del inventario de ciclo de vida y la modelación de los datos con la herramienta desarrollada, se obtuvo la huella de carbono para los diferentes tipos de asfaltos estudiados.

Se determinó la menor huella de carbono para el escenario 2 (asfalto verde con PET reciclado) con un valor de 354,25 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla. Consecuentemente, se localiza el escenario 1 (asfalto original) con un valor de 354,25 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla, seguido del escenario 3.2 (asfalto modificado con Elvaloy y PPA en planta eléctrica) con un valor de 357,05 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla. La mayor huella de carbono se mostró para el escenario 3.1 (asfalto modificado con Elvaloy y PPA en planta de combustible) igual a 357,13 kgCO<sub>2</sub>e/ton de mezcla.

Para todos los casos estudiados, el aporte de cada etapa del ciclo de vida a las emisiones totales en orden descendente es el siguiente: producción de materia prima, producción de mezcla asfáltica, transporte de materia prima, transporte de la mezcla asfáltica al sitio de construcción y construcción de los tramos. Al identificar la producción de materia prima como la fase con la mayor cantidad de emisiones GEI, se determinó a los agregados como

como su principal contribuidor, los cuales representan entre alrededor del 93% en peso de la masa de mezcla asfáltica analizada.

Asimismo, por medio de los resultados obtenidos de la huella de carbono para cada escenario estudiado, se puede afirmar que la implementación de PET reciclado en un asfalto verde disminuye las emisiones de GEI comparado con uno que no lo contenga. De esta manera se puede proponer como una opción ventajosa en términos ambientales, donde se evita que este material termine en vertederos, se reduce el impacto producido por los polímeros modificadores convencionales y, a la misma vez, se colabora en la mitigación del cambio climático.

### **Recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda la implementación de asfaltos verdes, específicamente utilizando PET reciclado como agente modificador, demostrando disminuciones en las emisiones de GEI como un aporte a la mitigación del cambio climático. Aparte de este material, se destaca la opción de incorporar otros materiales reciclados como RAP, PVC, LDPE o caucho de neumáticos reciclados en las mezclas asfálticas.

Otra posibilidad para disminuir las emisiones GEI es aplicar cambios dentro de los procesos involucrados en el ciclo de vida. Se destaca la disminución de temperatura en la producción de las mezclas asfálticas, pasando de una mezcla asfáltica caliente a una mezcla asfáltica tibia. Además, se pueden instalar sistemas de cogeneración de calentamiento para disminuir pérdidas energéticas durante el procesamiento de los materiales. Opciones como adquirir la materia prima de proveedores cercanos a la planta o cambiar el tipo de combustible con el que se genera la energía en las actividades de producción, se recomiendan como cambios que generan una reducción en la huella de carbono de un bien.

En conjunto con las opciones propuestas, se recomienda un posterior estudio donde se investigue la implementación de RAP y PET reciclado para la producción de asfaltos verdes, en conjunto con disminuciones en las temperaturas de producción. Esto con el fin de alinearse al proyecto de ley que indica obligatoriedad de incluir materiales reciclados en las obras viales y mitigando el efecto del cambio climático a la misma vez. Aunado al hecho de una reducción en gastos de producción debido a la sustitución de materiales vírgenes por unos reciclados.

En relación con los análisis de ciclos de vida, un análisis del perfil ambiental de los diferentes tipos de asfaltos se puede ampliar incluyendo otras categorías de impacto como agotamiento de los recursos fósiles, acidificación terrestre o indicadores relevantes como la huella hídrica. Aunado a esto, se recomienda la realización de un análisis que abarque el área ambiental, económica y de desempeño del producto sobre el uso de polímero reciclado en infraestructuras viales para en un análisis integral.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Protección Ambiental. (2014). *EPA Simplified GHG Emissions Calculator (SGEC)*. Obtenido de [http://www.epa.gov/climateleadership/documents/resources/lowemitter\\_guidance.pdf](http://www.epa.gov/climateleadership/documents/resources/lowemitter_guidance.pdf)
- Aguiar, J. P., Leiva, F., Loría, L. G., Villegas, R. E., & Navas, A. (2015). *Materiales de desecho como modificantes de la mezcla asfáltica*. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/548>
- Ahmad, A., Razali, A., Razelan, I., Jalil, S., Noh, M., & Idris, A. (2017). Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in bituminous mixture for improved performance of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 203. doi:<http://iopscience.iop.org/1757-899X/203/1/012005>
- AIMIX GROUP. (2020). *Planta De Asfalto Móvil*. Obtenido de <https://aimixgrupo.com.mx/planta-de-asfalto-movil/>
- Al-Qadi, I., Yang, R., Kang, S., Ozer, H., Ferrebee, E., Roesler, J., . . . Gillen, S. (2015). Scenarios Developed for Improved Sustainability of Illinois Tollway Life-Cycle Assessment Approach. *Journal of the Transportation Research Board*, 11-18. doi:10.3141/2523-02
- Álvarez, S. (2014). *Huella de Carbono de Organización y Producto con Enfoque Híbrido: Mejoras en el Método Compuesto de las Cuentas Contables*. (Tesis Doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Álvarez, S. (2014). *Huella de Carbono de Organización y Producto con Enfoque Híbrido: Mejoras en el Método Compuesto de las Cuentas Contables*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ambiental, Agencia de Protección. (2015). *Pollution Prevention Greenhouse Gas (GHG) Calculator*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/ghgconversion.xls>
- Ammann. (2014). *Prime: Planta asfáltica continua móvil*. Brasil: Ammann Group.
- Ammann. (2014). *Prime: Planta asfáltica continua móvil*. Obtenido de [http://www.ammann.com/wp-content/uploads/prime\\_02-2014\\_es-bra.pdf](http://www.ammann.com/wp-content/uploads/prime_02-2014_es-bra.pdf)
- AMMANN. (2020). *AFT 400-2 Tracked Asphalt Paver City Class Conventional*. Obtenido de <https://www.ammann.com/la-es/machines/asphalt-pavers/aft-400-2>

- AMMANN. (2020). *AV 110 X TIER 3 Rodillo Articulado Tándem*. Obtenido de <https://www.ammann.com/la-es/machines/soil-and-asphalt-compactors/tandem-rollers/av-110-x-tier-3>
- Angelone, S., Cauhapé, M., Borghi, M., & Martínez, F. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures*, *49*, 1655-1665. doi:10.1617/s11527-015-0602-x
- Araya, E. (2010). *Mejoramiento del proceso de producción y optimización de agregados producidos en el quebrador "Las Flores del Chirripó"*. Cartago: ICO TEC.
- Arroyo, P., Herrera, R., Salazar, L., Giménez, Z., Martínez, J., & Calahorra, M. (2018). A new approach for integrating environmental, social and economic factors to evaluate asphalt mixtures with and without waste tires. *Revista Ingeniería de Construcción*, *33*(3), 301-314.
- Arroyo, P., Herrera, R., Salazar, L., Giménez, Z., Martínez, J., & Calahorra, M. (2018). A new approach for integrating environmental, social and economic factors to evaluate asphalt mixtures with and without waste tires. *Revista Ingeniería de Construcción*, *33*(3), 301-314.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2020). *Ley 9828: Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial*. Obtenido de [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=91662&nValor3=121125&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=91662&nValor3=121125&strTipM=TC)
- Asociación Española para la Calidad. (2019). *Norma PAS 2050*. Obtenido de <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2050>
- Azapagic, A., Amienyo, D., Gujba, H., Jeswani, H., Esponiza, N., Morgan, A., . . . Stichnothe, H. (2012). *CCaLC Carbon Calculations over the Life Cycle of Industrial Activities*. Retrieved from <http://www.ccalc.org.uk/>
- Azevedo, M., Oliveira, M., Pereira, J. P., & Reis, A. (2011). Comparison of two LCA Methodologies in the Machine-Tools Environmental Performance Improvement Process . *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 575–580. doi:10.1007/978-3-642-19692-8
- Baptiste, V., Jullien, A., Moglia, O., Urrea, L., Oster, M., Pouget, S., . . . Dauvergne, M. (2016). Environmental and mechanical evaluation of warm mix asphalts in laboratory and on site. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1-11. doi:dx.doi.org/10.14311/EE.2016.184

- Benavides, C. (2017). *¿Por qué Costa Rica prefiere el asfalto para sus carreteras?* . Obtenido de Revista CONSTRUIR: <https://revistaconstruir.com/materiales-versus-costos-debate-las-carreteras-costa-rica>
- Bhatia, P., Cummis, C., Brown, A., Draucker, L., Rich, D., & Lahd, H. (2012). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. Switzerland: World Business Council for Sustainable Development.
- Bo, P., Chunli, C., Guangkai, Y., Wenying, L., & Yaowen, Z. (2015). Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(2), 116-124. doi:10.1016/j.jtte.2015.02.005
- Bo, P., Xueyong, F., Xunjie, W., & Wenying, L. (2017). Key steps of carbon emission and low-carbon measures in the construction of bituminous pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(6), 476-487. doi:10.1016/j.ijprt.2017.03.002
- Bravo, J. (18 de febrero de 2020). Obras viales deberán contar con, al menos, 50% de mezcla asfáltica hecha a base de materiales reciclados. *La Nación*. Obtenido de <https://www.nacion.com/el-pais/politica/obras-viales-deberan-contar-con-al-menos-50-de/XFZHRZH4IZGNROVPNYPTYK3IUU/story/>
- Brunner, F. (2018). *El LanammeUCR elabora asfalto con sostenibilidad ambiental*. Obtenido de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/07/10/el-lanammeucr-elabora-asfalto-con-sostenibilidad-ambiental.html>
- Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). Considering the Benefits of Asphalt Modification Using a New Technical Life Cycle Assessment Framework. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(5), 597-607. doi:doi:10.3846/13923730.2014.914084
- Cajina, N. (2020). *Diseño y evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con material de desecho*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Calahorra, M., Giménez, Z., Herrera, R., Martínez, J., & Salazar, L. (2016). Análisis de Ciclo de Vida de Mezcla Asfáltica con/sin Caucho: Estudio de Caso. *Proceedings of the VII Elagec*, 1-11.
- Castro, J. (2019). *Costa Rica superará 98% de generación eléctrica renovable por quinto año consecutivo*. Obtenido de <https://www.larepublica.net/noticia/costa-rica-superara-98-de-generacion-electrica-renovable-por-quinto-ano-consecutivo>
- Chatzinikolaou, S., Ventikos, N., Bilgili, L., & Celebi, U. (2016). *Green Energy and Technology*. Switzerland: Springer International Publishing.



- Chen, J., Su, W., & Huang, C. (2013). Method and Calculation Tool for Carbon Footprint Assessment of Machine Tool. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, 215-220. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2\\_35](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_35)
- Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. (2011). *Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. Barcelona: Comisión Interdepartamental del Cambio Climático.
- Corella, M. J. (2019). *Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica modificada con cloruro de polivinilo (PVC) según la tecnología Superpave*. (Tesis). San José: Universidad de Costa Rica.
- Corporación Interamericana de Inversiones. (2018). *Módulo 1: Implicaciones de la norma regional NTR B5 para la carbono neutralidad*. Washington: Corporación Interamericana de Inversiones.
- Cortés, M. (2015). *El Análisis de Ciclo de vida y sus principales softwares como herramientas de cálculo*. Obtenido de <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-sus-principales-softwares-como-herramientas-de-calculo/>
- Cummins. (2020). *Industrial Engines*. Obtenido de <https://www.dieselparts.com.au/wp-content/uploads/2013/04/Cummins-engine-catalogue.pdf>
- Department for Business, Innovation and Skills. (2014). *Product Carbon Footprinting*. United Kingdom: BSCI Group.
- DEUTZ. (2019). *DEUTZ TCD 2.9 L4*. Obtenido de <https://www.dieselmotornordic.com/en/products/deutz/mobile-machinery/tcd-2-9-l4/>
- Dong, Y., & Hauschild, M. (2017). Indicators for environmental sustainability. *Procedia CIRP*, 61, 697-702. doi:10.1016/j.procir.2016.11.173
- Dunn, J., Mueller, S., Qin, Z., & Wang, M. (2016). *Carbon Calculator for Land Use Change from Biofuels Production (CCLUB 2016)*. Obtenido de <https://greet.es.anl.gov/publications>
- Ecoinvent. (2013). *Ecoinvent 3.0*. Obtenido de <https://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-30/ecoinvent-30.html>
- Energy Information Administration. (2012). *PADD regions enable regional analysis of petroleum product supply and movements*. Obtenido de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=4890>

- Energy Information Administration. (2019). *Petroleum & Others Liquids*. Obtenido de [https://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_move\\_expcp\\_d\\_r10\\_NCS\\_mbbbl\\_a.htm](https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_move_expcp_d_r10_NCS_mbbbl_a.htm)
- Espinoza, M., & Campos, N. (2017). *¿Cómo Evaluar el Impacto Ambiental en un Proyecto de Infraestructura Vial?* San José: LanammeUCR.
- Espinoza, M., Campos, N., Yang, R., Ozer, H., Aguiar, J. P., Baldi, A., . . . Al-Qadi, I. (2019). Carbon Footprint Estimation in Road Construction: La Abundancia - Florencia Case Study. *Sustainability*, 11(8), 1-13. doi:10.3390/su11082276
- Europe Now. (2018). *Water Footprint Network: Using the Water Footprint Concept to Promote Sustainable, Fair, and Efficient Fresh Water Use*. Obtenido de <https://www.europenowjournal.org/2018/09/04/water-footprint-network-using-the-water-footprint-concept-to-promote-sustainable-fair-and-efficient-fresh-water-use/>
- Fjóla, G. (2018). *Plastic Waste in Road Construction in Iceland: an Environmental Assessment*. (Tesis de Maestría). Dinamarca: Technical University of Denmark.
- Franklin Miller Inc. (s.f.). *TASKMASTER TM8500 Shredder*. Obtenido de <https://franklinmiller.com/product/taskmaster-tm8500-shredder/>
- García, G. (2013). *Huella de Carbono- Carbonfootprint*. Madrid: Asociación Española para la Calidad.
- GlobeCore. (2020). *Plantas de Asfalto Modificado UVB-2*. Obtenido de <https://globecore.com/es/products/bitumen-modification-unit/bitumen-modification-unit-4-m3hour-production-capacity/>
- Goedkoop, M., Oele, M., Vieira, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *SimaPro Tutorial*. California: PRé Sustainability.
- Gómez, O., Torres, B., Rincón, L., & Rodríguez, L. (2018). *Instructivo Programa Open LCA*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Gutiérrez, K. F. (2019). *Comparación de métodos de incorporación de polietileno de baja densidad a una mezcla asfáltica*. (Tesis). San José: Universidad de Costa Rica.
- Han, H., Oneil, E., Bergman, R., Eastin, I., & Johnson, L. (2015). Cradle-to-gate life cycle impacts of redwood forest resource harvesting in northern California. *Journal of Cleaner Production*, 99, 217-229.
- Hatmoko, J., Hidayat, A., Setiawati, A., & Prasetyo, S. (2018). Measuring Carbon Footprint of Flexible Pavement Construction Project in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 31, 7-13. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183107001>

- Hatmoko, J., Hidayat, A., Setiawati, A., & Prasetyo, S. (2018). Measuring Carbon Footprint of Flexible Pavement Construction Project in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 31, 1-7. doi:10.1051/e3sconf/20183107001
- Instituto Meteorológico Nacional. (2019). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.
- International Standard Organization. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)*. Suiza: International Standard Organization.
- International Standard Organization. (2013). *Greenhouse Gases—Carbon Footprint Products—Requirements and Guidelines for Quantification and Communication (ISO 14067:2013)*. Suiza: International Standard Organization.
- International Standard Organization. (2018). *Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification (ISO 14067:2018)*. Suiza: International Standard Organization.
- Isasa, M., Gazulla, C., Zabalza, I., Zambraba, D., Partidario, P., & Pousse, M. (2014). *Evaluación del impacto del Ciclo de Vida y mejora de la eficiencia energética en áreas urbanas*. Madrid: 12º Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- Jegatheesan, N., Rengarasu, T., & Wasala, W. (2018). Effect of Polyethylene Terephthalate (PET) Fibres as Binder Additive in Hot Mix Asphalt Concrete. *The Institution of Engineers*, 175-182.
- Johansson, K. (2018). *Life cycle assessment of two end-of-life tyre applications: artificial turfs and asphalt rubber*. Suecia: Ragn-Sells.
- Kang, S., Yang, R., Ozer, H., & Al-Qadi, I. (2014). Life-Cycle Greenhouse Gases and Energy Consumption for Material and Construction Phases of Pavement with Traffic Delay. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 27-34. doi:10.3141/2428-04
- Kar, S., Behl, A., Shukla, A., & Jain, P. (2015). Estimation of Carbon Footprints of Bituminous Road Construction Process. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 5(6), 198-201. doi:http://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000198
- Kommalapati, R., Kadiyala, A., Shahriar, M., & Huque, Z. (2017). Review of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Different Photovoltaic and Concentrating Solar Power Electricity Generation Systems. *Energies*, 10(3), 350-368. doi:10.3390/en10030350

- Krug, T. (2015). *GHG Inventories: Their Importance to Monitor Progress in Climate Change Mitigation*. Okinawa: IPCC Open Symposium.
- LanammeUCR. (2018). *Pavimentos Verdes: La ruta al desarrollo sostenible*. Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/afiche-promocional.html>
- Leiva, F., & Vargas, A. (2014). Recommended Best Practices For Using Rap In Asphalt Pavements For Costa Rica.
- Leiva, F., & Vargas, A. (2017). Recommended Best Practices For Using Rap In Asphalt Pavements For Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial*, 19(33), 35-44.
- Lemus, E. A., Mosquera, J. L., & Virviescas, X. A. (2018). *Estudio de Mezclas Asfálticas Densas con Adición de Materiales Alternativos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Leng, Z., Al-Qadi, I. L., & Cao, R. (2017). Life-Cycle Economic and Environmental Assessment of Warm Stone Mastic Asphalt. *Transportmetrica A: Transport Science*, 14(7), 562-575. doi:10.1080/23249935.2017.1390707
- Li, X., Chen, L., & Ding, X. (2019). Allocation Methodology of Process-Level Carbon Footprint Calculation in Textile and Apparel Products. *Sustainability*, 11, 1-14. doi:10.3390/su11164471
- Ivel, J., Watson, R., Abbassi, B., & Hamatneh, Z. (2019). Life cycle analysis of concrete and asphalt used in road pavements. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 52-61. doi:<https://doi.org/10.4491/eer.2018.399>
- Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., & Wang, C. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(351), 1-15. doi:0.3390/ijerph13030351
- Martinho, F., Picado, L., & Capitão, S. (2018). Feasibility Assessment of the Use of Recycled Aggregates for Asphalt Mixtures. *Sustainability*, 10(6), 1-23. doi:10.3390/su10061737
- Massolo, L. (2015). *Introducción a las Herramientas de Gestión Ambiental*. Argentina: EDULP.
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H., & Lee, S. J. (2016). Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 190-201. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>

- Ministry of Infrastructure and the Environment. (2011). *Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle Purpose*. Holanda: NL Agency, Ministry of Infrastructure and the Environment.
- Miranda, F. (2019). *¿Calles de “cemento” o asfalto? Conozca datos importantes de nuestras carreteras*. Obtenido de <https://bloglanammeucr.wordpress.com/2019/04/04/calles-de-cemento-o-asfalto-conozca-datos-importantes-de-nuestras-carreteras/>
- Monturiol, M. (2019). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con PET*. (Tesis). San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Mukherjee, A. (2016). *Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration*. Maryland: National Asphalt Pavement Association.
- Mukherjee, A., Dylla, H., & Willis, R. (2016). Lessons learned in developing an environmental product declaration program for the asphalt industry in North America. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1-9. doi:dx.doi.org/10.14311/EE.2016.323
- Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Life Cycle Assessment. *Environmental Management*, 57–75. doi:10.1016/b978-0-12-811989-1.00005-1
- Nassar, I., Kabel, K., & Ibrahim, I. (2012). Evaluation of the Effect of Waste Polystyrene on Performance of Asphalt Binder. *ARP Journal of Science and Technology*, 2(10), 927-935.
- Nugent, D., & Sovacool, B. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65, 229–244. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048
- Organización de las Naciones Unidas. (2018). *Cambio climático* . Obtenido de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. *Environments*, 6(73), 1-55. doi:10.3390/environments6060073
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2019). *Costa Rica Superará 99% de Generación Eléctrica Renovable en 2019*. Obtenido de <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2019/12/costa-rica-superara-99-de-generacion-electrica-renovable-en-2019/>
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2019). *Presidente Alvarado extiende moratoria petrolera hasta el año 2050*. Obtenido de

<https://presidencia.go.cr/comunicados/2019/02/presidente-alvarado-extiende-moratoria-petrolera-hasta-el-ano-2050/>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Ramírez, A., Ladino, I., & Rosas, J. (2014). *Diseño de Mezcla Asfáltica con Asfalto Caucho Tecnología GAP Graded para la Ciudad de Bogotá*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- RECOPE. (2018a). *Calidad y seguridad de productos: Asfalto*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/calidad-y-seguridad-de-productos/asfalto/>
- RECOPE. (2018b). *Datos Estadísticos Anuales de Importación*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/estadisticas-de-importacion-y-exportacion/>
- RECOPE. (2019a). *Importación de hidrocarburos*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/contrataciones/importacion-de-hidrocarburos/>
- RECOPE. (2019b). *Manual de Productos*. Costa Rica: RECOPE.
- RECOPE. (2020). *Precios Vigentes*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/tabla-precios/>
- Reyes, F., & Rondón, H. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: ECOE Ediciones.
- Reyes, F., & Rondón, H. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Colombia: ECOE Ediciones.
- Rojas, G. A. (2020). *Implementación de protocolo de análisis en laboratorio de materiales antioxidantes para el asfalto*. (Tesis de licenciatura). San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Rojas, N. E. (2019). *Diseño de pavimento modificado con la adición de plástico reciclado para ciclovías*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Saez, E. (2011). *ADM, alta eficiencia en producción de asfalto*. Obtenido de <https://www.construccion-pa.com/uncategorized/adm-alta-eficiencia-en-produccion-de-asfalto/>

- Sampedro, A., Del Val, M., Gallego, J., Querol, N., & Del Pozo, J. (2012). Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP. *Asfaltos y Pavimentos*, 22, 12-22.
- Sandí, A. L. (2018). *Herramientas para la estimación de Huella de Carbono de proyectos constructivos*. (Tesis). Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2010). *Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*. Illinois: Portland Cement Association.
- Santos, J., Cerezo, V., Soudani, K., & Bressi, S. (2018). A Comparative Life Cycle Assessment of Hot Mixes Asphalt Containing Bituminous Binder Modified with Waste and Virgin Polymers. *Procedia CIRP*, 69, 194–199. doi:10.1016/j.procir.2017.11.046
- Santosa, J., Cerezob, V. S., & Bressid, S. (2018). A comparative life cycle assessment of hot mixes asphalt containing bituminous binder modified with waste and virgin polymers. *25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*, 194-199. doi:doi: 10.1016/j.procir.2017.11.046
- Schlegel, T., Puiatti, D., Ritter, H., Lesueur, D., Denayer, C., & Shtiza, A. (2016). The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. *Transportation Research Part D*, 48, 141-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.005>
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Scott, H., Hendrickson, C., & Metthews, D. (2015). *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter*. Obtenido de <https://csed.engine.umich.edu/assets/LCA-Book-Front-Matter-and-Chapter-1-01-07-16.pdf>
- Sea-Distances. (2019). *Sea Distances and Ports Distances*. Obtenido de <https://sea-distances.org/>
- Singh, D., Kumar, P., Kataware, A., & Habal, A. (2017). Evaluating Performance of PPA-and-Elvaloy-Modified Binder Containing WMA Additives and Lime Using MSCR and LAS Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533
- Soratana, K., Rasutis, D., Azarabadi, H., Eranki, P., & Landis, A. (2017). Guayule as an alternative source of natural rubber: A comparative life cycle assessment with Hevea

- and synthetic rubber. *Journal of Cleaner Production*, 159, 271-280. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.070>
- Sreeram, A., Leng, Z., Padhan, R., & Qu, X. (2018). Sreeram, A., Leng, Z., Padhan, R. K., & Qu, X. (2018). Eco-friendly paving materials using waste PET and reclaimed asphalt pavement. *HKIE Transactions*, 25(4), 237-247. doi:10.1080/1023697x.2018.1534617
- Tahmoorian, F., Bracken, R., Wheatley, M., & Yeaman, J. (2019). Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt Containing Recycled Materials: Case Study in Australia. *Airfield and Highway Pavements*, 143-149. doi:<https://doi.org/10.1061/9780784482476.016>
- Thiel, C., Stengel, T., & Gehlen, C. (2014). Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials. *Eco-Efficient Construction and Building Materials*, 368-403. doi:10.1533/9780857097729.2.368
- Torre, N. (2012). *Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) de una Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*. (Tesis). Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Ulloa, A. (2011). Mezclas asfálticas tibias (MAT). *Boletín Técnico PITRA*, 2(15).
- Vallejo, L. (2016). *Los Buques Asfalteros: La Importacia del Sistema de Calefacción*. Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona.
- Van de Ven, M. S., Jenkins, K. J., & Van den Beemt, C. (2012). New developments with half-warm foamed bitumen asphalt mixtures for sustainable and durable pavement solutions. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 731-730. doi:10.1080/14680629.2012.742630
- Ventikos, N., Chatzinikolaou, S., Bilgili, L., & Celebi, U. (2016). *Green Energy and Technology*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Villegas, R. E., Aguiar, J. P., & Loria, L. G. (2015). *Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos*. Costa Rica: Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales.
- Villegas, R. E., Aguiar, J. P., Loria, L. G., & Navas, A. (2014). *Procedimientos para la caracterización de ligantes asfálticos modificados*. San Pedro, Costa Rica: Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal Life Cycle Assess*, 21(9), 1218-1230. doi:10.1007/s11367-016-108



- Widojoko, L., & Purnamasari, P. (2012). Study the Use of Cement and Plastic bottle Waste as Ingredient Added to the Asphaltic Concrete Wearing Course. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, 832-841. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.158>
- Wildnauer, M., Mulholland, E., & Liddie, J. (2019). *Life Cycle Assessment of Asphalt Binder*. Kentucky: Asphalt Institute.
- Young, B., Morelli, B., & Hawkins, T. (2017). *Creation of Unit Process Data for Life Cycle Assessment of Steam Methane Reforming and Petroleum Refining*. Illinois: Franklin Associates.
- Young, B., Morelli, B., & Hawkins, T. (2017). *Creation of Unit Process Data for Life Cycle Assessment of Steam Methane Reforming and Petroleum Refining*. Illinois: Franklin Associates.
- Zhang, F., & Yu, J. (2010). The research for high-performance SBR compound modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 24, 419-418. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.003
- Ziyadi, M., Ozer, H., & Al-Qadi, I. (2017). *Functional Unit Choice for Comparative Pavement LCA Involving Use Stage with Pavement Roughness Uncertainty Quantification (UQ)*. Illinois: University of Illinois at Urbana - Champaign.

## APÉNDICES

### A) Cuestionarios

#### A.1. Cuestionario sobre Datos Generales de la Planta Asfáltica

##### 1. Información específica del proyecto en construcción

	Dato	Comentarios
<b>Dimensiones del proyecto</b>	Largo: Ancho: # carriles:	
<b>Espesor de la estructura de cada capa</b>		
<b>Vida útil esperada</b>		
<b>Duración de construcción y fecha estimada</b>		

##### 2. Información general sobre los materiales utilizados

Material	Dato	Comentarios
<b>Ligante asfáltico</b>	Tipo: Grado de desempeño:	
<b>Agregados</b>	Tipo: Gradación: Fuente:	
<b>Materiales reciclados</b>	Tamaño: Humedad:	

3. ¿Cuál es diseño de las mezclas asfálticas por utilizar? Por favor, ajunte detalles si están disponibles.

4. ¿Cuál es diseño estructural del pavimento por utilizar y secciones transversales? Por favor, ajunte detalles si están disponibles.

5. ¿Cuál es diseño de construcción y estándar de construcción de carreteras que se utiliza? Por favor, ajunte detalles si están disponibles.

- Diseño de construcción de carreteras:
- Estándar construcción de carreteras:

### **A.2. Cuestionario sobre Asfalto (importación y almacenamiento)**

1. Información sobre el **transporte** del asfalto del **puerto de ingreso del material al plantel** de almacenamiento.

**Distancia** promedio entre el puerto y el plantel de almacenamiento:

**Vehículo** (si aplica) más común utilizado para transportar el asfalto entre el puerto y el plantel de almacenamiento:

Vehículos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L/kg <sub>asfalto</sub> )	Capacidad (kg <sub>asfalto</sub> )	Comentarios

2. ¿Cómo se **almacena** el asfalto en el plantel?

Equipo de almacenamiento	Capacidad (kg <sub>asfalto</sub> )	Temperatura promedio (°C)	Tiempo promedio de almacenamiento de asfalto (h/L <sub>asfalto</sub> )	Comentarios

3. En general, ¿qué tipo de combustible y electricidad es utilizado en sus instalaciones?

Combustible/Electricidad	Unidad (L o kWh)	Cantidad (por ton de material o total anual)	Comentarios
Electricidad			
Diésel			
Gas Natural			
Otros			

4. ¿Cuál es el **sistema de calefacción** utilizado para el almacenamiento del asfalto en el plantel?

\_\_\_ Eléctrico      ¿kWh consumidos promedio por equipo de almacenamiento?

\_\_\_ Combustible      Tipo de combustible utilizado:

Cantidad promedio utilizada:

\_\_\_ Otro      Especifique:

### **A.3. Cuestionario sobre Agregados Pétreos**

1. Por favor describa sus **procedimientos** en las operaciones de producción de agregado (operaciones, equipos por operación, capacidades de equipos).

2. Información sobre el **transporte del material** al sitio de producción.

**Distancia** entre el sitio de **extracción** y las **instalaciones** de procesamiento:

**Vehículo** para transportar el material entre estos sitios:

Vehículos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L/kg <sub>agregados</sub> )	Capacidad (kg <sub>agregados</sub> )	Comentarios

3. ¿Qué tipos de **equipos** se utilizaron en sus instalaciones y cuál fue el consumo de **combustible y electricidad**?

Equipos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L o kWh/kg <sub>agregados</sub> )	Productividad (kg <sub>agregados</sub> /h)	Comentarios

**4. Información sobre los agregados producidos.**

Tipo de agregado	Producción anual (ton)	Porcentaje de humedad (%)	Valor en el mercado (CRC)	Comentarios

**A.4. Cuestionario sobre Material Reciclado**

1. Por favor describa sus **procedimientos** en las operaciones reprocesamiento de material reciclado (Operaciones, equipos por operación, capacidades de equipos).
2. ¿De dónde proviene típicamente el material reciclado?
3. Distancia que recorre el material al transportarlo a sus instalaciones e información del transporte.

Distancia: \_\_\_\_\_

Vehículos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L/kg <sub>material</sub> )	Capacidad (kg <sub>material</sub> )	Comentarios

**4. ¿Cómo se almacena el material?**

Antes del procesamiento	Después del procesamiento
Tipo de materia prima:	Equipo(s) de almacenaje:
Equipo(s) de almacenaje:	Tiempo:
Tiempo:	

5. ¿Registra la humedad del material luego de procesarlo?

Sí \_\_\_

No \_\_\_

En caso que sea sí, por favor indique el valor,

Valor de humedad: \_\_\_\_\_

6. Características del material

Tamaño de partícula:

Composición:

Otras:

7. ¿Cuál es la producción anual del material procesado?

8. ¿Cuál es el valor del material en el mercado?

9. ¿Cuál es el procedimiento de producción?

Operaciones	Equipos por operación	Productividad (kg <sub>material</sub> /h)

**10. ¿Qué tipos de equipos se utilizaron en sus instalaciones y cuál fue el consumo de combustible y electricidad?**

Equipos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L o kWh/kg <sub>material</sub> )	Productividad (kg <sub>material</sub> /h)	Comentarios

**11.** Cantidad de paneles solares utilizados (si aplica): \_\_\_\_\_

**12.** Cantidad de energía generada y consumida por la producción (si aplica):

Energía generada: \_\_\_\_\_ kWh/mes

Energía consumida: \_\_\_\_\_ kWh/mes

Si no se consume toda la electricidad, ¿qué se hace con el remanente?

**13.** Tecnología de panel solar y marca (si aplica).

Colector solar \_\_\_\_\_

Celdas fotovoltaicas \_\_\_\_\_ (monocristalinas \_\_\_\_\_ policristalina \_\_\_\_\_ amorfos \_\_\_\_\_)

Marca panel:

Modelo del panel:

**14.** Capacidad nominal del panel en kWp (kilowatt pico) (si aplica): \_\_\_\_\_

**15.** Tipo de instalación de paneles (si aplica).

Techo inclinado \_\_\_\_\_

Techo plano \_\_\_\_\_

Campo abierto \_\_\_\_\_

Sobre fachado vertical \_\_\_\_\_

Otro \_\_\_\_\_

**16. Arreglo de paneles solares**

Paneles individuales \_\_\_\_\_

Paneles conectados \_\_\_\_\_

**A.5. Cuestionario sobre Transporte y Almacenamiento de Asfalto en la Planta de Mezcla Asfáltica****1. Información sobre el transporte del asfalto al sitio de producción.****Distancia** entre el suplidor y las instalaciones de producción:**Vehículo** para transportar el material:

Vehículos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L/kg <sub>asfalto</sub> )	Capacidad (kg <sub>asfalto</sub> )	Comentarios

**2. ¿Cómo se almacena el asfalto en sus instalaciones?**

Equipo de almacenamiento	Capacidad (kg <sub>asfalto</sub> )	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Comentarios

**3. Información sobre el asfalto utilizado.**

Tipo de asfalto	Producción anual (ton)	Valor en el mercado (CRC)	Comentarios

**4. En general, ¿qué tipo de combustible y electricidad es utilizado en sus instalaciones?**

Combustible/Electricidad	Unidad (L o kWh)	Cantidad (por ton de material o total anual)	Comentarios
Electricidad			
Diésel			
Gas Natural			
Otros			





**3. Información sobre el quemador utilizado en sus instalaciones.**

Equipo	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L)	Comentarios

**4. ¿Cuáles son algunas distancias típicas de donde obtuvo sus materiales en el 2019?**

Material	Uso Anual (ton)	Distancia (km)	Modo de Transporte (ej. camión, barco, tren)	Comentarios

**5. Describa cómo se almacenan los materiales.**

- Asfalto bituminoso:
  
- Agregado:
  
- Polímeros modificantes:
  
- Material reciclado:
  
- Mezcla asfáltica:

**6. ¿Qué tipos de equipos se utilizaron en sus instalaciones y cuál fue el consumo de combustible y electricidad?**

Equipos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L o kWh/kg <sub>agregados</sub> )	Productividad (kg <sub>agregados</sub> /h)	Comentarios

### **A.7. Cuestionario sobre Construcción de los Tramos de Carretera**

1. Describa sus procedimientos de construcción (incluyendo operaciones, equipos por operaciones, dosis).
  
2. ¿Cuáles son algunas **distancias** típicas de transporte de la planta al sitio en km?
  
3. ¿Qué tipos de **vehículos** se utilizaron para la construcción?

Vehículos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L/ kg <sub>mezcla</sub> )	Capacidad (kg <sub>mezcla</sub> )	Comentarios

4. Describa el **equipo** típico utilizado en sus operaciones de construcción.

Equipos	Marca y Modelo	Tipo de combustible	Cantidad de combustible utilizada (L o kWh/kg <sub>mezcla</sub> )	Productividad (kg <sub>mezcla</sub> /h)	Comentarios

## B) Resultados intermedios

### B.1. Información relativa a la comparación de varios ACV de mezclas asfálticas

**Cuadro XXI.** Características y resultados de investigaciones con unidades funcionales diferentes a “tonelada de mezcla asfáltica”

Referencia	Unidad funcional	Dimensiones	Volumen por unidad funcional /( $m^3$ )	Masa de mezcla por unidad funcional /(ton)	Casos estudiados	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e (kg/unidad funcional)	Total de emisiones CO <sub>2</sub> e (kg/ton <sub>mezcla</sub> )
Leng, Al-Qadi y Cao (2017)	Milla de carretera por carril	Largo: 1 609 m Ancho: 3,6 m Espesor: 0,0445 m	257,8	685,3*	1. HMA	30 290	44,2
					2. WMA	28 448	41,5
Arroyo et al. (2018)	Kilómetro de carretera por 2 carriles	Largo: 1 000 m Ancho: 7 m Espesor: 0,18 m	1 260	3 384,1	1. HMA	1 450 800	428,7
					2. HMA NFU 10%	1 390 900	411,0
Santos et al. (2018)	Kilómetro de carretera por 2 carriles	Largo: 1 000 m Ancho: 7 m Espesor: 0,14 m	980	2 632,1	1. HMA	453 306	172,2
					2. HMA 5% Caucho	371 038	141,0
					3. HMA 5% Caucho Planta GLP	406 746	154,5
Rojas (2019)	Kilómetro de ciclo vía	Largo: 1 000 m Ancho: 1,8 m Espesor: 0,2 m	360	966,9	1. HMA	1 367 566	1 414
					2. WMA PET 6%	1 328 595	1 374

\*Menciona explícitamente la masa de mezcla utilizada para el proyecto.

**Cuadro XXII.** Nivel de importancia por etapa del ciclo de vida para mezclas asfálticas en otras investigaciones

Referencia	Casos	Materia prima		Mezcla asfáltica		Materia prima y mezcla		Construcción	Fin de la vida
		Producción	Transporte	Producción	Transporte	Producción	Transporte		
Calahorra, Giménez, Herrera, Martínez y Salazar (2016)	1. HMA	-	3°	-	-	1°	-	2°	-
	2. HMA Caucho 10%	-	3°	-	-	1°	-	2°	-
Arroyo et al. (2018)	1. HMA	-	-	2°	-	-	1°	3°	-
	2. HMA Caucho 10%	-	-	2°	-	-	1°	3°	-
Baptiste et al. (2016)	1. HMA	1°	3°	2°	-	-	-	4°	-
Leng, Al-Qadi y Cao (2017)	1. HMA	1°	-	2°	3°	-	-	4°	-
	2. WMA	1°	-	2°	3°	-	-	4°	-
Tahmoorian et al. (2019)	1. HMA	1°	3°	2°	-	-	-	-	-
Van de Ven, Jenkins y Van den Beemt (2012)	1. WMA Asfalto espumoso	-	-	-	2°	1°	-	-	3°
Sampedro, Del Val, Gallego, Querol y Del Pozo (2012)	1. HMA	1°	-	2°	-	-	3°	4°	-
	2. HMA-RAP 20%	1°	-	2°	-	-	3°	4°	-
	3. HMA-RAP 70%	2°	-	1°	-	-	3°	4°	-
	4. HMA RAP/NFU 20%	1°	-	2°	-	-	3°	4°	-
	5. HMA RAP/NFU 50%	1°	-	2°	-	-	3°	4°	-
Kang et al. (2014)	1. HMA-RAP 6%	-	1°	-	2°	-	-	3°	-
Peng, Cai, Yin, Li y Zhan (2015)	1. HMA	-	3°	1°	4°	-	-	2°	-

\*Nota: "1°" indica la etapa con mayor importancia, así sucesivamente de manera decreciente hasta "4°", representando la etapa de menor importancia.

### C) Muestra de cálculo

#### C.1. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 1

A partir del diseño de la mezcla se toma un porcentaje total sobre mezcla (PTM) de 6,1%.

Para el asfalto convencional se toma como base 1 ton (1 000 kg) de mezcla.

La masa total de la mezcla se calcula por medio de la ecuación C.1.

$$m_{mezcla} = m_{ASF} + m_{AG} \quad (C.1)$$

Donde,

$m_{mezcla}$ : Masa de la mezcla, kg

$m_{ASF}$ : Masa de asfalto, kg

$m_{AG}$ : Masa de agregados, kg

La masa total de asfalto se calcula de la siguiente manera.

$$m_{ASF} = \frac{m_{AG} \cdot \%PTM}{\%PTM \cdot 100} \quad (C.2)$$

Donde,

$\%PTM$ : Porcentaje total de asfalto sobre mezcla, %

Si se sustituye la ecuación C.2 en la ecuación C.1 y se despeja la masa del agregado de la ecuación C.1, se puede calcular la masa del agregado.

$$m_{AG} = \frac{m_{mezcla}}{\left(1 + \frac{\%PTM}{100 - \%PTM}\right)} \quad (C.3)$$

De esta manera, se obtiene el siguiente resultado despejando la masa del agregado de la ecuación C.3.

$$m_{AG} = \frac{1000 \text{ kg}}{\left(1 + \frac{6,1}{100 - 6,1}\right)} = 939 \text{ kg}$$

Además, en la planta de producción se tiene establecido para los agregados un 62% de polvos finos y un 38% de grueso; por lo que se calculan las cantidades respectivas de apilamientos.

$$m_{Finos} = m_{AG} \cdot 0,62 \quad (C.4)$$

Donde,

$m_{Finos}$ : Masa de polvos finos, kg

$$m_{Fino} = 939 \text{ kg} \cdot 0,62 = 582,12 \text{ kg}$$

$$m_{Grueso} = m_{AG} \cdot 0,38 \quad (B.5)$$

Donde,

$m_{Grueso}$ : Masa de apilamiento grueso, kg

$$m_{Grueso} = 939 \text{ kg} \cdot 0,38 = 356,82 \text{ kg}$$

Se procede con el cálculo de la masa del asfalto despejando de la ecuación C.1.

$$m_{ASF} = m_{mezcla} - m_{AG} \quad (C.6)$$

$$m_{ASF} = 1000 \text{ kg} - 939 \text{ kg} = 61 \text{ kg}$$

### C.2. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 2

La masa total de la mezcla se calcula de la siguiente manera, resaltando que estas ecuaciones aplican para cualquier material reciclaje, no solamente PET.

$$m_{mezcla} = m_{ASF} + m_{AG} + m_{PET} \quad (C.7)$$

Donde,

$m_{mezcla}$ : Masa de la mezcla, kg

$m_{ASF}$ : Masa de asfalto, kg

$m_{AG}$ : Masa de agregados, kg

$m_{PET}$ : Masa de PET, kg

En la ecuación B.7 se sustituye la ecuación C.2 y la masa del PET (o material reciclado), obteniéndose la siguiente ecuación.

$$m_{mezcla} = m_{AG} \cdot \left( \frac{\%PTM}{\%PTM \cdot 100} \right) + m_{AG} + m_{AG} \cdot \left( \frac{\%PET}{100} \right) \quad (C.8)$$

Donde,

$\%PET$ : Porcentaje de PET en la mezcla, %

Se despeja la masa del agregado, obteniéndose la ecuación a continuación.

$$m_{AG} = \frac{m_{mezcla}}{1 + \left( \frac{\%PTM}{\%PTM \cdot 100} \right) + \frac{\%PET}{100}} \quad (C.9)$$

Para el caso donde se utiliza un 1% de PET, se obtiene una masa de agregados como la siguiente.



$$m_{AG} = \frac{1000 \text{ kg}}{1 + \left(\frac{6,1}{6,1 \cdot 100}\right) + \frac{1}{100}} = 930,26 \text{ kg}$$

Utilizando la ecuación C.2, la masa de asfalto requerida en este caso corresponde a la siguiente.

$$m_{ASF} = \frac{930,26 \text{ kg} \cdot 6,1}{6,1 \cdot 100} = 60,43 \text{ kg}$$

Partiendo de que en la planta producción se tiene establecido para los agregados un 62% de polvos finos y un 38% de grueso, se obtienen los siguientes resultados utilizando las ecuaciones C.4 y C.5 respectivamente.

$$m_{Finos} = 930,26 \text{ kg} \cdot 0,62 = 576,76 \text{ kg}$$

$$m_{Grueso} = 930,26 \text{ kg} \cdot 0,38 = 353,50 \text{ kg}$$

El PET corresponde al 1% de los agregados, por lo que se obtiene una masa de:

$$m_{PET} = m_{AG} \cdot \%PET \quad (C.10)$$

$$m_{PET} = 930,26 \text{ kg} \cdot 1\% = 9,30 \text{ kg}$$

La nueva masa del agregado añadiendo el PET se obtiene de la siguiente manera.

$$m_{AG}^* = m_{Finos} + m_{Grueso} + m_{PET} \quad (C.11)$$

Donde,

$m_{AG}^*$ : Masa de agregados con PET, kg

$$m_{AG}^* = 576,76 \text{ kg} + 353,50 \text{ kg} + 9,30 \text{ kg} = 939,57 \text{ kg}$$

Se recalculan las proporciones totales de la masa de agregados con PET.

$$\%m_{Finos}^* = \frac{m_{Finos}}{m_{AG}^*} \cdot 100 \quad (C.12)$$

Donde,

$\%m_{Finos}^*$ : Porcentaje máxico de polvos finos para agregado con PET, %

$$\%m_{Finos}^* = \frac{576,76 \text{ kg}}{939,57 \text{ kg}} \cdot 100 = 61,39\%$$

$$\%m_{Grueso}^* = \frac{m_{Grueso}}{m_{AG}^*} \cdot 100 \quad (C.13)$$

Donde,

$\%m_{Grueso}^*$ : Porcentaje máxico de apilamiento grueso para agregado con PET, %

$$\%m_{Grueso}^* = \frac{353,50 \text{ kg}}{939,57 \text{ kg}} \cdot 100 = 37,62\%$$

Debido a que se agregó PET a los agregados, se recalcula el%PTM por medio de la siguiente ecuación.

$$\%PTM = \frac{m_{ASF}}{m_{ASF} + m_{AG} + m_{PET}} \cdot 100 \quad (C.14)$$

$$\%PTM = \frac{60,43 \text{ kg}}{60,43 \text{ kg} + 930,26 \text{ kg} + 9,30 \text{ kg}} \cdot 100 = 6,04$$

### **C.3. Cálculo del diseño de mezcla para el Escenario 3**

Se utilizan los valores y resultado de la sección C.1 en la muestra de cálculos de la ecuación C.3 y C.6. La cantidad de agregados es calculada por medio de la ecuación C.3, los cuales corresponden a 939 kg. La masa total de asfalto modificado requerida se calcula por medio de la ecuación C.6, correspondiendo a un valor de 61 kg.

Para la cantidad de polímero requerido, se calcula sobre el valor del asfalto de la siguiente manera.

$$\frac{\%POL}{100\%} = \frac{m_{POL}}{m_{ASF\ MOD} - m_{POL}} \quad (C.15)$$

Donde,

$\%POL$ : Porcentaje de polímero, %

$m_{POL}$ : Masa del polímero, kg

$m_{ASF\ MOD}$ : Masa del asfalto modificado, kg

Si se conoce que se va a utilizar un 1,2% de Elvaloy, se despeja la masa requerida de Elvaloy de la ecuación C.15.

$$\frac{1,2\%}{100\%} = \frac{m_{Elvaloy}}{61\ kg - m_{Elvaloy}}$$

$$m_{Elvaloy} = 0,723\ kg$$

De la misma forma, si se va a utilizar 0,2% de PPA, se despeja la masa de la ecuación C.15.

$$\frac{0,2\%}{100\%} = \frac{m_{PPA}}{61\ kg - m_{PPA}}$$

$$m_{PPA} = 0,122 \text{ kg}$$

La masa total de asfalto original se calcula por medio de la ecuación C.16.

$$m_{ASF} = m_{ASF \text{ MOD}} - m_{Elvaloy} - m_{PPA} \quad (\text{C.16})$$

$$m_{ASF} = 61 \text{ kg} - 0,723 \text{ kg} - 0,122 \text{ kg}$$

$$m_{ASF} = 60,155 \text{ kg}$$

#### **C.4. Cálculo del factor de conversión de unidad funcional**

Para las investigaciones donde no se presentada la masa utilizada en la construcción del respectivo proyecto, se calculó el factor de conversión de la siguiente manera.

El volumen de la mezcla para ciertas dimensiones específicas, se calcula por medio de la siguiente ecuación.

$$V_{mezcla} = l * a * e \quad (\text{C.17})$$

Donde,

$V_{mezcla}$ : Volumen de la mezcla,  $m^3$

$l$ : Largo, m

$a$ : Ancho, m

$e$ : Espesor, m

A partir de las dimensiones de largo, ancho y espesor del Cuadro II, se calcula el volumen utilizando la ecuación C.17.

$$V_{mezcla} = 22,04 * 2,05 * 0,1 = 4,52 \text{ m}^3$$

Se calcula el factor de conversión tomando en cuenta volumen de mezcla por masa de mezcla utilizada por medio de la ecuación C.18.

$$FC = \frac{V_{mezcla}}{m_{mezcla}} \quad (C.18)$$

Donde,

$FC$ : Factor de conversión,  $m^3/ton_{mezcla}$

$V_{mezcla}$ : Volumen de la mezcla,  $m^3$

$m_{mezcla}$ : Masa de la mezcla, ton

El volumen utilizado se toma del resultado de la ecuación C.17 y la masa requerida para construir ese tramo se especifica en el Cuadro II, columna 2, fila 5.

$$FC = \frac{4,52 \text{ m}^3}{12,135 \text{ ton}} = 0,372 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}_{mezcla}}$$

### **C.5. Cálculo de la conversión de unidad funcional**

1. Cálculo de la masa de mezcla requerida (en caso que se tenga el valor de la masa utilizada se omite este paso, situación que ocurre para el ACV del Cuadro XXI, fila 2).

Para el cálculo de la masa de la mezcla se utiliza la ecuación descrita a continuación.

$$m_{mezcla} = \frac{V_{mezcla}}{FC_{UF}} \quad (C.19)$$

Donde,

$FC_{UF}$ : Factor de conversión de la unidad funcional,  $m^3/ton_{mezcla}$

$V_{mezcla}$ : Volumen de la mezcla,  $m^3$

$m_{mezcla}$ : Masa de la mezcla, ton

El siguiente ejemplo de cálculo se realizó de acuerdo con los datos de la investigación Rojas (2019). El volumen se toma del Cuadro XXI, columna 4, fila 5 y el factor de conversión obtenido mediante la ecuación C.18. El resultado se detalla en el Cuadro XXI, columna 5, fila 5.

$$m_{mezcla} = \frac{360 \text{ m}^3}{0,377 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}_{mezcla}}} = 956,1 \text{ ton}_{mezcla}$$

2. Conversión de la huella de carbono con unidad funcional original a nueva unidad funcional (tonelada de mezcla asfáltica)

Por medio de la ecuación C.20 se determina la huella de carbono resultante.

$$HC_2 = \frac{HC_1}{m_{mezcla}} \quad (\text{C.20})$$

Donde,

$HC_1$ : Huella de carbono según la unidad funcional original,  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{ton}_{mezcla}$

$HC_2$ : Huella de carbono según la unidad funcional tonelada de mezcla asfáltica,  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{ton}_{mezcla}$

La huella de carbono según la unidad funcional original se detalla en el Cuadro XXI, columna 7 y la masa de la mezcla se toma del resultado obtenido de la ecuación C.20, para mostrar el resultado en el Cuadro XXI, columna 8.

$$UF_2 = \frac{1\,328\,595 \text{ kgCO}_2\text{e}}{956,1 \text{ ton}_{mezcla}} = 1390 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{ton}_{mezcla}}$$

### C.6. Cálculo del consumo de combustible o de electricidad por kilogramo de material

Los datos recolectados de fuentes primarias se obtuvieron por en términos de masa del material por capacidad de equipo o lote. Sin embargo se deben ajustar según las unidades requeridas por la herramienta de cuantificación de la huella de carbono, tal cálculo se realiza por medio de la siguiente ecuación.

$$F_x = \frac{F_{xtotal}}{m_x} \quad (C.21)$$

Donde,

$F_x$ : Fuente de emisión del producto x por kilogramo, (kWh o L)/kg<sub>x</sub>

$F_{xtotal}$ : Fuente de emisión del producto x por masa total, (kWh o L)/kg<sub>xtotal</sub>

$m_x$ : Masa total del producto x, kg<sub>xtotal</sub>

El ejemplo de cálculo se muestra para el almacenamiento de asfalto en la planta de RECOPE en el

Cuadro **VII**, fila 2, tomando la fuente de emisión por masa total del material de la columna 6 y la masa de la columna 5. Los resultados se especifican en la columna 7.

$$F_x = \frac{25\,000 \text{ L/kg}_{total}}{322\,694 \text{ kg}_{total}} = 0,0775 \text{ L/kg}_{safalfo}$$

Los mismos cálculos se realizaron para las actividades relativas al asfalto, PET reciclado, asfalto modificado y mezcla asfáltica del Cuadro VI. Igualmente, para el Cuadro VI, se utiliza la fuente de emisión por masa total del material de la columna 6 y la masa de la columna 5, mostrando los resultados en la columna 7 al aplicar la ecuación C.21.

Los agregados también se calculan de esta manera, pero previamente requieren un cálculo extra para determinar el valor de la fuente de emisión por masa total. El cálculo se realiza por medio de la ecuación C.22, donde el factor de conversión se toma el precio dado por RECOPE por litro de combustible o el precio de kWh proporcionado por el ICE.

$$F_{xtotal} = \frac{F_{x\phi}}{FC_{\phi}} \quad (C.22)$$

Donde,

$F_{xtotal}$ : Fuente de emisión del producto x por masa total, (kWh o L)/kg<sub>xtotal</sub>

$F_{x\phi}$ : Fuente de emisión del producto x en colones por masa total,  $\phi$ /kg<sub>xtotal</sub>

$FC_{\phi}$ : Factor de conversión económico,  $\phi$ /(kWh o L)

El ejemplo de cálculo se desarrolla para el polvo de piedra en el

Cuadro VII, fila 3. La fuente de emisión en colones se toma de la columna 4, y el factor de conversión económico para el diésel es de 552  $\phi$ /L. el resultado se detalla en la columna 6.

$$F_{xtotal} = \frac{439 \phi/\text{kg}_{total}}{552 \phi/\text{L}} = 0,795 \text{ L}/\text{kg}_{total}$$

El mismo cálculo se realiza para los casos donde se utiliza electricidad, donde el factor de conversión económico para la electricidad es de 124,98  $\phi$ /kWh.

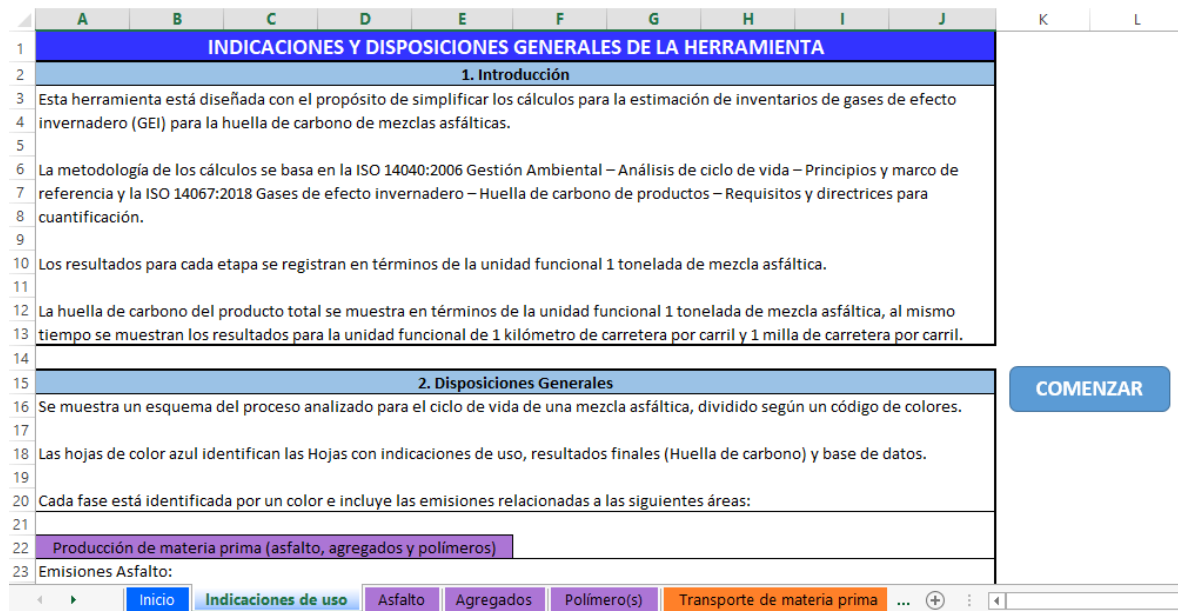
#### **D) Descripción general de la herramienta e instrucciones de uso**

En este apartado se describe la herramienta sección por sección, aunado con las indicaciones de uso de la misma. La sección de Inicio es lo primero que se observa al abrir



la herramienta, mostrada previamente en la Figura 12. Se despliega un esquema general de las etapas del ciclo de vida de la mezcla asfáltica para un alcance de la cuna a la tierra. Asimismo, se encuentra la unidad funcional y los recuadros editables. Se localizan botones para direccionar al usuario a la sección de indicaciones, comenzar con los cálculos o borrar los datos que hayan sido ingresados.

Posteriormente, se detallan las instrucciones de uso de la herramienta como se observa en la Figura 31. En dicha sección se observa una introducción de las normas en las que se basa, las disposiciones generales en las que se subdivide cada etapa analizada, las indicaciones generales de uso, la manera en que se puede actualizar periódicamente la base de datos y las variaciones en caso de utilizar la herramienta en otros países.



**Figura 31.** Sección relacionada a las Indicaciones de uso de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono de mezclas asfálticas (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Las indicaciones de uso presentadas en dicha sección se muestran a continuación.

Disposiciones generales:

Se muestra un esquema del proceso analizado para el ciclo de vida de una mezcla asfáltica, dividido según un código de colores. Las hojas de color azul identifican las que son relacionadas a las indicaciones de uso, resultados finales (Huella de carbono) y base de datos. Cada fase está identificada por un color e incluye las siguientes áreas para evaluar las emisiones:

- Producción de materia prima (asfalto, agregados y polímeros) - Morado

Emisiones Asfalto:

- Extracción y refinamiento del petróleo: Zonas PADD de Estados Unidos, Estados Unidos y opción de agregar otras zonas.
- Transporte marítimo desde planta de refinamiento hasta puerto de ingreso.
- Transporte terrestre del asfalto desde el puerto de ingreso al plantel de almacenamiento de asfalto.
- Almacenamiento en plantel.

Emisiones Agregados:



- Extracción del material.
- Transporte del material extraído a la planta de producción de agregados.
- Producción de diferentes agregados: Polvo de piedra, quartilla, quintilla, otros.

Emisiones Polímeros: Si aplica, si no se utiliza este material es posible dejar los espacios vacíos.

- Producción del polímero según polímero(s) que se utilice(n).
  - Transporte del polímero a la planta reprocesadora (si aplica).
  - Reprocesamiento del polímero (si aplica)
- Transporte de la materia prima a la planta de producción de mezcla asfáltica - Anaranjado

- Transporte del asfalto de plantel de almacenamiento a la planta productora de mezcla asfáltica.
- Transporte de los agregados a la planta productora de mezcla asfáltica.
- Transporte del polímero(s) a la planta productora de mezcla asfáltica (si aplica).
- Producción de mezcla asfáltica – Verde
  - Almacenamiento del asfalto en la planta productora de mezcla asfáltica.
  - Producción de asfalto modificado (si aplica).
  - Funcionamiento del quemador en la planta productora de mezcla asfáltica.
  - Producción en la planta de mezcla asfáltica.
- Transporte de mezcla asfáltica a la zona de construcción de la vía - Amarillo
- Construcción de la carretera - Rosado

Indicaciones generales de uso:

1. Los cuadros editables se muestran de la siguiente manera: 
2. Los cuadros editables pueden permanecer vacíos o colocar 0 en caso de las secciones que no apliquen al proceso de estudio.
3. Los cuadros con resultados de emisiones totales se muestran de la siguiente manera: 
4. Seleccionar botón “Indicaciones” para revisar las indicaciones de uso generales en la Hoja de Inicio.
5. Seleccionar botón “Comenzar” en la Hoja de Inicio o en la de Indicaciones de uso para ingresar los datos del inventario en la herramienta.
6. Seleccionar botón "Borrar datos" en la Hoja de Inicio para borrar los datos ingresados en toda la herramienta.
7. Para cada subsección donde aparezcan listas desplegables, seleccionar la flecha hacia abajo y la casilla correspondiente al escoger opciones.

8. Seguir indicaciones en caso de que la Hoja lo indique, como en los casos de utilizar cierta opción.
9. Utilizar las flechas en la parte inferior de cada Hoja para navegar de una etapa a otra.
10. Seleccionar botón “Huella de carbono” en la parte inferior de cada Hoja para ir a los resultados finales.
11. En la Hoja “Huella de Carbono” se muestra el resultado final. Cada botón redirecciona a la Hoja correspondiente para cada etapa. Botón “Inicio” redirecciona a la Hoja inicial de la herramienta.
12. Cada dato del inventario se coloca por kg de material analizado en cada Hoja y según las unidades indicadas en cada subsección. El "Combustible consumido" contabiliza la cantidad en términos de  $(L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{asfalto}} * \text{km}_{\text{recorridos}})$ , pero por simplicidad se utiliza  $(L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{asfalto}})$
13. La última subsección llamada “Conversión a unidad funcional” aparece en cada Hoja. Colocar la cantidad de material requerida por unidad funcional. En caso de utilizar otra unidad funcional se cambia en cantidad y unidad.

#### Actualización de la base de datos:

Es recomendable actualizar las bases de datos periódicamente para realizar los cálculos de la huella de carbono con la información más reciente. Es posible que la mayoría de datos no cambien, si este es el caso, permanecen igual. Se recomienda una revisión anual de la sección “Base de datos” según cada subtema, como se describe a continuación.

##### 1. Asfalto de Estados Unidos

Emisiones se recopilaron por medio de la investigación realizada por Young, Morelli y Hawkins (2017), no es necesaria su modificación a menos que se obtengan datos actualizados por medio de otras investigaciones científicas o reportes emitidos por una organización del país en cuestión.

##### 2. Transporte de Asfalto

Las emisiones se recopilaron por medio de la investigación realizada por Chatzinikolaou et al. (2016), no es requerida su modificación a menos que se obtengan datos actualizados por medio de otras investigaciones científicas o reportes emitidos por una organización de renombre.

### 3. Índices Potencial de Calentamiento Global

No varían periódicamente, por lo que se recomienda revisar anualmente. Para el caso de Costa Rica, se documentan en el informe anual de Factores de emisión de gases de efecto invernadero emitido por el Instituto Meteorológico Nacional. El reporte se publica en la siguiente dirección: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/category/publications/>

Aplicado a otros países y Costa Rica, los datos se pueden revisar en la página oficial del IPCC, en el nombre de "Global Warming Potential Values". Para su búsqueda diríjase a:

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

### 4. Factores de Emisión para Combustibles en País de Estudio

Información relativa se actualiza anualmente en el informe anual de Factores de emisión de gases de efecto invernadero emitido por el Instituto Meteorológico Nacional y publicado en la siguiente dirección: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/category/publications/>

### 5. Factores de Emisión Anuales para Electricidad Generada en País de Estudio

Información relacionada se actualiza anualmente en el informe anual de Factores de emisión de gases de efecto invernadero emitido por el Instituto Meteorológico Nacional, el mismo se obtiene en la siguiente dirección:

<http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/category/publications/>

### 6. Factor de Emisión para Electricidad Generada con Energía Solar

Los factores de emisión se recopilaron a través de la investigación realizada por Kommalapati et al. (2017), no es necesario modificarlos a menos que se obtengan datos actualizados por medio de otras investigaciones científicas o reportes generados por una organización de renombre.

### 7. Polímeros Modificantes

Las emisiones del caucho sintético, Elvaloy, PEAD reciclado, PET reciclado, PPA fueron tomadas de la base de datos Ecoinvent 3. En dado caso que exista una nueva versión y acceso a la misma u otra base de datos, se pueden actualizar los valores. Igualmente, para el SBR y SBS se pueden actualizar los valores en caso de acceso a otra base de datos o investigación científica realizada.

#### Instrucciones para utilizar la herramienta en otros países:

La herramienta se desarrolló con el objetivo de cuantificar la huella de carbono de mezclas asfálticas en Costa Rica, pero es posible aplicarla en otras latitudes. A continuación, se detallan las consideraciones y cambios a realizar en la base de datos.

- Transporte de asfalto

Cambiar las emisiones para el tipo de embarcación, si aplica, a países diferentes de América Latina. Estos datos se pueden encontrar en bases de datos o en investigaciones previas relativas al tema.

- Factores de emisión para combustibles en país de estudio

Actualizar los factores de emisión para combustibles disponibles en el país de estudio. Usualmente son desarrollados por organizaciones nacionales o empresas relacionadas al área ambiental. Dado caso que no se encuentren, es posible obtener los valores a nivel global emitidos por el IPCC en los reportes en inglés llamados “Refinement to the 2009 IPCC Guidelines for National GHG Inventories”. Dichos documentos se pueden encontrar en el siguiente link: <https://www.ipcc.ch/reports/>, donde el último reporte disponible se encuentra actualizado al 5 de diciembre, 2019.

- Factores de emisión anuales para electricidad generada en país de estudio

Actualizar los factores de emisión relacionados a la generación de electricidad en el país de estudio. Usualmente son desarrollados por organizaciones nacionales, empresas relacionadas al área ambiental o existen datos históricos.

Posteriormente, se encuentran las secciones divididas por etapas. La primera se identifica para el asfalto en la Figura 32, Figura 33 y Figura 34. En Costa Rica no se refina petróleo, por lo cual se utiliza información de bases de datos para los cálculos. Se debe seleccionar la zona de Estados Unidos o ingresar las emisiones de una zona diferente. El transporte marítimo se cuantifica por medio de las horas que se transporta, y el traslado terrestre por medio de combustible, ambos utilizando de la ecuación 1 (véase sección 1.5). Se selecciona el tipo de combustible, se ingresa la distancia recorrida y el volumen de combustible utilizado. El resto de los cálculos los realiza la herramienta, haciendo uso de los factores de emisión localizados en la base de datos. Esta misma situación ocurre en todas las subdivisiones de cada etapa donde se utilice combustible, ya sea en transporte u operaciones.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>MATERIA PRIMA: ASFALTO</b>							
2	<b>1. Huella de carbono del asfalto importado</b>							
3	Zona de dónde proviene	PADD 3						
4	Emisiones de CO <sub>2</sub> e	2,169	kg <sub>CO2</sub> e/kg <sub>Asfalto</sub>					
5	Emisiones de otra zona:		kg <sub>CO2</sub> e/kg <sub>Asfalto</sub>					
6								
7	<b>2. Transporte del asfalto importado al puerto de ingreso</b>							
8	Duración del recorrido		h					
9								
10	Sustancia	Emisiones /(kg <sub>sustancia</sub> /año*kg <sub>Asfalto</sub> )	Masa de cada gas liberado /(kg <sub>sustancia</sub> )	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente /(kg <sub>CO2</sub> e)			
11	Dióxido de carbono	0,592	0,0000	1	0,00000			
12	Metano	0,0000193	0,00000000	21	0,00000000			
13	Óxido nitroso	0,00165	0,000000	310	0,00000000			
14				Emisiones	0,000	kg <sub>CO2</sub> e/kg <sub>Asfalto</sub>		
15								

**Figura 32.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

En la última subdivisión, se debe ingresar la cantidad de asfalto utilizado para producir una tonelada de mezcla asfáltica y la herramienta calcula la huella de carbono respectiva.

16 **3. Transporte del asfalto de puerto de ingreso a plantel de almacenamiento de asfalto**

17 Tipo de combustible

18 Distancia  km

19 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{asfalto}}$

20

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
22 Dióxido de carbono	2,613	0,00000	1	0,00000
23 Metano	0,000382	0,000000000	21	0,000000000
24 Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,000000000
25 Emisiones				0,00000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{asfalto}}$

**Figura 33.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

27 **4. Almacenamiento en plantel**

28 Tipo de combustible

29 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{asfalto}}$

30

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
32 Dióxido de carbono	2,613	0,000	1	0,000
33 Metano	0,000382	0,000000	21	0,00000
34 Óxido nitroso	0,00002442	0,0000000	310	0,00000
35 Emisiones				0,00000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{asfalto}}$

37 **6. Conversión a unidad funcional**

	Cantidad	Unidad
38 Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica
40 Cantidad de asfalto requerida en mezcla asfáltica	<input type="text"/>	$\text{kg}_{\text{asfalto}}/\text{ton}_{\text{mezcla}}$
41 Total emisiones de CO <sub>2</sub> e del asfalto	2,17	$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{asfalto}}$
42		
43 Total emisiones de CO <sub>2</sub> e debido al asfalto	0,00	$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{ton}_{\text{mezcla}}$
44		

45

46

47

48

49

50

Asfalto Agregados Polímero(s) Transporte de materia prima Producción de la mezcla T ...

**Figura 34.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al asfalto, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)



Se continúa con el registro para las emisiones generadas por los agregados, material producido en Costa Rica. Se determina la extracción del material y el transporte del mismo por medio de equipos que funcionan con combustible, mientras que la producción se lleva a cabo utilizando electricidad (Figura 35).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>MATERIA PRIMA: AGREGADOS</b>							
2	<b>1. Extracción del material</b>							
3	Zona de extracción							
4	Tipo de combustible	Diésel						
5	Combustible consumido		$L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$					
6								
7	Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$			
8	Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000			
9	Metano	0,000382	0,00000000	21	0,00000000			
10	Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,00000000			
11	Emisiones				0,0000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$			
13	<b>2. Transporte del material extraído a la planta de producción de agregados</b>							
14	Tipo de combustible	Diésel						
15	Distancia		km					
16	Combustible consumido		$L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$					
17								
18	Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$			
19	Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000			
20	Metano	0,000382	0,00000000	21	0,00000000			
21	Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,00000000			
22	Emisiones				0,0000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$			

**Figura 35.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

En la subdivisión de producción de agregados se pueden seleccionar los tipos de agregados pétreos o agregar otros que no se encuentren especificados, de acuerdo con la Figura 36. Similar al cálculo de las emisiones de GEI cuando se requiere combustible, al utilizar electricidad como fuente de energía, la herramienta toma los factores de emisión de la base de datos y la ecuación 1 para mostrar los resultados.

24 **3. Producción de diferentes tipos de agregados**

25

26 Tipo de Agregados

27  Polvo de piedra

28  Cuartilla

29  Quintalla

30  Otro

31

32

33

34

35 *Polvo de piedra*

36 Electricidad consumida  kWh/kg<sub>polvo de piedra</sub>

37 Emisiones 0,000000 kg<sub>CO2e</sub>/kg<sub>polvo de piedra</sub>

38

39 *Cuartilla*

40 Electricidad consumida  kWh/kg<sub>cuartilla</sub>

41 Emisiones 0,000000 kg<sub>CO2e</sub>/kg<sub>cuartilla</sub>

42

43 *Quintilla*

44 Electricidad consumida  kWh/kg<sub>quintilla</sub>

45 Emisiones 0,000000 kg<sub>CO2e</sub>/kg<sub>quintilla</sub>

46

47 *Otro 1:*

48 Electricidad consumida  kWh/kg \_\_\_\_\_

49 Emisiones 0,000000 kg<sub>CO2e</sub>/kg \_\_\_\_\_

50

51 *Otro 2:*

52 Electricidad consumida  kWh/kg \_\_\_\_\_

53 Emisiones 0,000000 kg<sub>CO2e</sub>/kg \_\_\_\_\_

**Figura 36.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Finalmente, la proporción de agregados pétreos por utilizar se determina según el diseño de mezcla. La Figura 37 indica la subdivisión donde se pueden agregar estos valores, ya que las emisiones pueden variar entre cada tipo de agregado. Asimismo, dependiendo de la información que provea el proveedor, métodos de asignación de emisiones son muy utilizados para estos materiales. Las emisiones generadas en esta fase se cuantifican por medio de la ecuación 1 en caso de no requerir asignación de emisiones, mientras que utiliza la ecuación 3 si fuera necesario aplicarlo.

4. Conversión a unidad funcional		
	Cantidad	Unidad
Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica
Tipo de agregados	Proporción de agregados /(%)	Factores de asignación /(%)*
Polvo de piedra		
Cuartilla		
Quintilla		
Otro 1:		
Otro 2:		
Otro 3:		
*Nota: Agregar factores de asignación en caso de ser necesario, caso contrario dejar vacío		
Cantidad total de agregados requerida en mezcla asfáltica		$k_{\text{agregado}}/\text{ton}_{\text{mezcla}}$
Total de emisiones $\text{CO}_2\text{e}$ de los agregados	0,0000	$k_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$
Total de emisiones $\text{CO}_2\text{e}$ debido a los agregados	0,00	$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{ton}_{\text{mezcla}}$

**Figura 37.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los agregados, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

La sección de polímeros no aplica para todos los casos, por lo que se puede dejar el espacio vacío sin alterar los resultados. Al utilizar polímeros reciclados, se puede requerir información de la base de datos obtenida por fuentes secundarias o, si el usuario conoce los datos de transporte o reprocesamiento del material reciclado se selecciona la opción que dice información propia, mostrado en la Figura 38. Asimismo, según la cantidad de polímeros la herramienta indica la ruta por seguir.

MATERIA PRIMA: POLÍMERO							
*Solamente aplica si se utiliza(n) polímero(s) reciclado(s)							
Fuentes para procesamiento del polímero reciclado:							
<input checked="" type="radio"/> Información de base de datos		<input type="radio"/> Información propia		<input type="button" value="Utilice datos de Sección 1"/>			
1. Huella de carbono debida a la fabricación del polímero							
<input checked="" type="radio"/> No		<input type="radio"/> Sí		<input type="button" value="Utilice Opción 1"/>			

**Figura 38.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Se definieron dos rutas para mostrar de una manera más amigable la información. En las actividades de transporte y reprocesamiento de materiales reciclado, se calcula la huella de carbono por medio de la ecuación 1. Los equipos para el reprocesamiento de polímeros disponibles en el mercado pueden funcionar con combustible o electricidad, por lo que se proporciona al usuario la elección de fuente de energía, mostrado en la Figura 39.

**Opción 1**

Tipo de polímero: Sin polímero

Otro:

Nombre del polímero:

Ingresar emisiones:   $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero1}}$

Emisiones: 0,000  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero1}}$

**Opción 2**

Polímero 1: Sin polímero

Otro:

Nombre del polímero:

Ingresar emisiones:   $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero1}}$

Emisiones: 0,000  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero1}}$

Polímero 2: Sin polímero

Otro:

Nombre del polímero:

Ingresar emisiones:   $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero2}}$

Emisiones: 0,000  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero2}}$

Polímero 3: Sin polímero

Otro:

Nombre del polímero:

Ingresar emisiones:   $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero3}}$

Emisiones: 0,000  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero3}}$

**2. Transporte del polímero a planta reprocesadora de polímero**

Tipo de combustible: Diésel

Distancia:  km

Combustible consumido:   $\text{L}_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{polímero\_repro}}$

Sustancia	Factor de emisión $/( \text{kg}_{\text{sustancia}} / \text{L}_{\text{combustible}} )$	Masa de cada gas liberado $/( \text{kg}_{\text{sustancia}} )$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/( \text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} )$
Dióxido de carbono	2,613	0,00000	1	0,00000
Metano	0,000382	0,000000000	21	0,000000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,0000000000	310	0,000000000
Emisiones				0,00000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero\_reproc}}$

**3. Reprocesamiento del polímero**

Fuente de energía para reprocesar el polímero:

Combustible → Utilice Opción 2

Electricidad

**Opción 1: Combustible**

Tipo de combustible: Diésel

Combustible consumido:   $\text{L}_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{polímero\_reproc}}$

Sustancia	Factor de emisión $/( \text{kg}_{\text{sustancia}} / \text{L}_{\text{combustible}} )$	Masa de cada gas liberado $/( \text{kg}_{\text{sustancia}} )$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/( \text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} )$
Dióxido de carbono	2,613	0,00000	1	0,00000
Metano	0,000382	0,0000000	21	0,0000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,0000000
Emisiones				0,00000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero\_reproc}}$

**Opción 2: Electricidad**

Tipo de generación de electricidad:

Sistema Nacional de Electricidad

Energía Solar con Paneles Fotovoltaicos

Energía Solar por Concentración

Factor de emisión: 0,0502  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kWh}$

Electricidad consumida:   $\text{kWh}/\text{kg}_{\text{polímero\_reproc}}$

Emisiones: 0,0000  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero\_reproc}}$

**Figura 39.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

La masa utilizada de cada polímero se ingresa según el diseño de mezcla. La herramienta se encarga de sumar las emisiones según las opciones que indicó el usuario y, muestra el resultado final para este material en la subdivisión visible en la Figura 40.

4. Conversión a unidad funcional		
	Cantidad	Unidad
Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica
Cantidad de polímero 1 requerida en mezcla asfáltica		kg <sub>polímero1</sub> /ton <sub>mezcla</sub>
Cantidad de polímero 2 requerida en mezcla asfáltica		kg <sub>polímero2</sub> /ton <sub>mezcla</sub>
Cantidad de polímero 3 requerida en mezcla asfáltica		kg <sub>polímero3</sub> /ton <sub>mezcla</sub>
Cantidad de polímero reprocesado		kg <sub>polímero_reproc</sub> /ton <sub>mezcla</sub>
Total de emisiones CO <sub>2</sub> e debido a polímero(s)	0,00	kg <sub>CO2e</sub> /ton <sub>mezcla</sub>

Anterior      Siguiete

Huella de carbono

Inicio   Indicaciones de uso   Asfalto   Agregados   Polímero(s)   Transporte de materia prima

**Figura 40.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a los polímeros modificantes, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

El transporte de materia prima se calcula por medio de la ecuación 1 y los factores de emisión de la base de datos. Se dividió por tipo de materia prima mostrado en la Figura 41 y en la Figura 42. En esta fase no se requiere agregar la masa de utilizada de cada material, ya que la herramienta se encarga de tomar los valores definidos en las secciones anteriores.

TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA				
1. Transporte asfalto de plantel de almacenamiento a planta productora de mezcla asfáltica				
Tipo de combustible	Diésel			
Distancia		km		
Combustible consumido		$L_{combustible}/kg_{asfalto}$		
Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{sustancia}/L_{combustible})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{sustancia})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{CO2e})$
Dióxido de carbono	2,613	0,000	1	0,000
Metano	0,000382	0,0000000	21	0,000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,0000000	310	0,000000
Emisiones				0,0000 kg <sub>CO2e</sub> /kg <sub>asfalto</sub>

**Figura 41.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de materia prima, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

13 **2. Transporte de agregados a la planta de producción de mezcla asfáltica**

14 Tipo de Agregados

15  Polvo de piedra

16  Cuartilla

17  Quintalla

18  Otro

23

24 Tipo de combustible

25 Distancia  km

26 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$

27

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
29 Dióxido de carbono	2,613	0,000	1	0,000
30 Metano	0,000382	0,0000000	21	0,000000
31 Óxido nitroso	0,00002442	0,00000000	310	0,000000
32 Emisiones				0,0000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{agregado}}$

34 **3. Transporte del polímero a planta productora de mezcla asfáltica**

35 Tipo de combustible

36 Distancia  km

37 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{polímero(s)}}$

38

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
39 Dióxido de carbono	2,613	0,00000	1	0,00000
40 Metano	0,000382	0,000000000	21	0,0000000
41 Óxido nitroso	0,00002442	0,0000000000	310	0,0000000
42 Emisiones				0,0000 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{polímero(s)}}$

43

44 **4. Conversión a unidad funcional**

	Cantidad	Unidad
45 <b>Unidad funcional</b>	1	ton de mezcla asfáltica
46		
47		
48		
49		
50		
51		
52		
53		
54		
55		
56		
57		

54

55

56

57

Anterior   Huella de carbono

Indicaciones de uso | Asfalto | Agregados | Polímero(s) | **Transporte de materia prima** | Produ ...

**Figura 42.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de materia prima, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

En toda planta de producción, es necesario que los tanques de almacenamiento de asfalto posean calentamiento para que el material esté fluido (Lemus, Mosquera, & Virviescas, 2018). Por esta razón se decidió agregar este cálculo, donde se toman los factores de emisión de la base de datos y la ecuación 1 en la cuantificación de las emisiones según se muestra en la Figura 43.

PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA				
1. Almacenamiento asfalto original en planta productora de mezcla asfáltica				
Tipo de combustible	Diésel			
Combustible consumido	$L_{combustible} / kg_{asfalto}$			
Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{sustancia} / L_{combustible})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{sustancia})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{CO_2e})$
Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000
Metano	0,000382	0,00000000	21	0,000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,000000
Emisiones				0,0000 kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> /kg <sub>asfalto</sub>

**Figura 43.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Para los casos donde se utilice una modificación por vía húmeda, aplica la subdivisión mostrada en la Figura 44. En el mercado se pueden encontrar plantas para modificar el asfalto que funcionan con combustible o electricidad, y la herramienta permite esta selección.

2. Producción de asfalto modificado (si aplica)				
Fuente de energía para modificar el asfalto:				
<input checked="" type="radio"/> Combustible <input type="radio"/> Electricidad				
Utilice Opción 1				
Opción 1: Combustible				
Tipo de combustible	Diésel			
Combustible consumido	$L_{comb} / kg_{asfalto\_modificado}$			
Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{sustancia} / L_{combustible})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{sustancia})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{CO_2e})$
Dióxido de carbono	2,613	0,000	1	0,000
Metano	0,000382	0,00000000	21	0,000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,00000000	310	0,000000
Emisiones				0,0000 kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> / kg <sub>asfalto\_modificado</sub>
Opción 2: Electricidad				
Tipo de generación de electricidad				
<input type="radio"/> Sistema Nacional de Electricidad <input checked="" type="radio"/> Energía Solar con Paneles Fotovoltaicos <input type="radio"/> Energía Solar por Concentración				
Factor de emisión      0,0502 kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> /kWh				
Electricidad consumida      kWh / kg <sub>asfalto\_modificado</sub>				
Emisiones      0,0000 kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> / kg <sub>asfalto\_modificado</sub>				

**Figura 44.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Las secciones posteriores se relacionan directamente al funcionamiento de la planta procesadora de la mezcla asfáltica, donde los factores de emisión también se encuentran en la base de datos y las emisiones se determinan utilizando la ecuación 1, ejemplificados en la Figura 45. No se requiere en ingreso de la masa utilizada ya que en este caso se toma como base 1000 kg de mezcla asfáltica de acuerdo con la unidad funcional seleccionada.

28 **3. Funcionamiento del quemador en la planta de producción de mezcla asfáltica**

29 Tipo de combustible

30 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{mezcla}}$

31

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
32 Dióxido de carbono	3,025	0,000	1	0,000
33 Metano	0,391	0,0000	21	0,000
34 Óxido nitroso	0,023	0,00000	310	0,000
35 Emisiones				0,0000 $kg_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{mezcla}}$

36

38 **4. Producción de mezcla asfáltica en planta**

39 Tipo de combustible

40 Combustible consumido   $L_{\text{combustible}}/\text{kg}_{\text{mezcla}}$

41

Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{\text{sustancia}}/$ $L_{\text{combustible}})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{\text{sustancia}})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{\text{CO}_2\text{e}})$
42 Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000
43 Metano	0,000382	0,00000000	21	0,000000
44 Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,000000
45 Emisiones				0,0000 $kg_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kg}_{\text{mezcla}}$

46

48 **5. Conversión a unidad funcional**

	Cantidad	Unidad
49 Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica

50

51 Total de emisiones CO <sub>2</sub> e debido a la producción de la mezcla asfáltica	0,00	$kg_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{ton}_{\text{mezcla}}$
---	------	---

52

53

54

55

56

Asfalto Agregados Polímero(s) Transporte de materia prima Producción de la mezcla

**Figura 45.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la producción de la mezcla asfáltica, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Con respecto al transporte de la mezcla asfáltica y construcción de la vía, solamente se requiere el dato del consumo de combustible por parte del vehículo, según la Figura 46 y la Figura 47. Si la producción se realiza en el mismo sitio de construcción de la vía, los espacios



relacionados a la etapa de transporte pueden permanecer vacíos. Para ambas secciones las emisiones se cuantifican utilizando los factores de emisión de la base de datos y la ecuación 1 para 1000 kg de mezcla en concordancia con la unidad funcional.

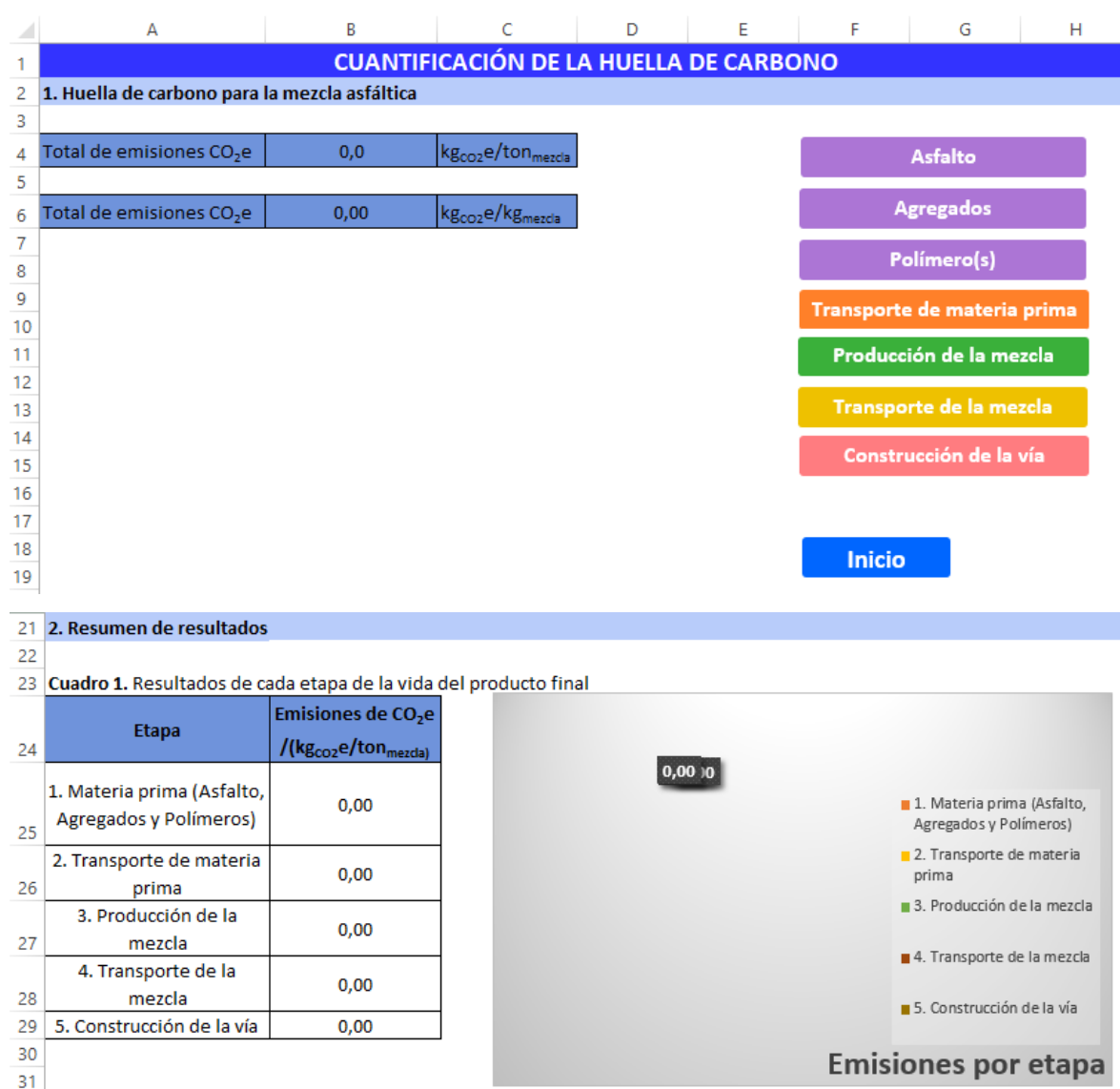
TRANSPORTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA				
<b>1. Transporte de la mezcla asfáltica al sitio de construcción</b>				
Tipo de combustible	Diésel			
Distancia		km		
Combustible consumido		$L_{combustible}/kg_{mezcla}$		
Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{sustancia}/L_{combustible})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{sustancia})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{CO_2e})$
Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000
Metano	0,000382	0,00000000	21	0,00000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,00000000
Emisiones				0,0000 $kg_{CO_2e}/kg_{mezcla}$
<b>2. Conversión a unidad funcional</b>				
	Cantidad	Unidad		
Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica		
Total emisiones CO <sub>2</sub> e debido al transporte de la mezcla asfáltica	0,00	$kg_{CO_2e}/ton_{mezcla}$		

Figura 46. Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada al transporte de la mezcla asfáltica (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

CONSTRUCCIÓN DE LA CARRETERA				
<b>1. Construcción de la carretera</b>				
Tipo de combustible	Diésel			
Combustible consumido		$L_{combustible}/kg_{mezcla}$		
Sustancia	Factor de emisión $/(kg_{sustancia}/L_{combustible})$	Masa de cada gas liberado $/(kg_{sustancia})$	Potencial de calentamiento global de la sustancia (GWP)	Masa de CO <sub>2</sub> equivalente $/(kg_{CO_2e})$
Dióxido de carbono	2,613	0,0000	1	0,0000
Metano	0,000382	0,00000000	21	0,00000000
Óxido nitroso	0,00002442	0,000000000	310	0,00000000
Emisiones				0,0000 $kg_{CO_2e}/kg_{mezcla}$
<b>2. Conversión a unidad funcional</b>				
	Cantidad	Unidad		
Unidad funcional	1	ton de mezcla asfáltica		
Total de emisiones CO <sub>2</sub> e debido a la construcción	0,00	$kg_{CO_2e}/ton_{mezcla}$		
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>Anterior</span> <span>Siguiente</span> <span>Huella de carbono</span> </div>				

Figura 47. Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono relacionada a la construcción de la vía (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

En cuanto a la huella de carbono total, se muestra en la Figura 48, donde se suman todas las emisiones de las etapas anteriores en términos de kilogramos de dióxido de carbono equivalente por unidad funcional. Se presentan los accesos directos a cada fase por si se desea verificar en alguna de ellas. Asimismo, las emisiones de cada etapa se detallan en la subdivisión 2, donde también se genera un gráfico según el aporte de cada fase a la huella de carbono del producto final.



**Figura 48.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono total de la mezcla asfáltica, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Debido al gran uso de varias unidades funcionales, la herramienta permite la conversión de la misma. Solamente se requiere ingresar las dimensiones del proyecto y se puede reflejar el resultado en términos de otras unidades funcionales más utilizadas, como se presenta en la Figura 49.

36	<b>3. Cambio de unidad funcional</b>		
37			
38	Unidad funcional		
39	<input checked="" type="radio"/> Kilómetro de carretera por carril		
40	<input type="radio"/> Milla de carretera por carril		
41	<input type="radio"/> Otra		
42			
43			
44			
45	<b>Dimensiones del proyecto</b>		
46	Largo de la vía /(m)	1000,0	
47	Ancho del carril /(m)		
48	Espesor de la capa /(m)		
49	Volumen total /(m <sup>3</sup> )	0	
50			
51			
52	<b>Total de emisiones CO<sub>2</sub>e</b>	<b>0,0</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>e/km*carril</b>
53			

← ... Transporte de la mezcla Construcción de la vía **Huella de Carbono** BASE DE DATOS +

**Figura 49.** Sección de la herramienta para el cálculo de la huella de carbono total de la mezcla asfáltica, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

Por último, se muestra la base de datos, en donde es posible actualizar o modificar según las instrucciones detalladas en la herramienta (Sección Indicaciones de uso). Cada subtema presenta la descripción de los datos, la fuente de información, el año y la zona geográfica a la que aplica para que el usuario determine si es necesario cambiar algún dato o si aplica a su caso, según se observa en la Figura 50, la Figura 51 y la Figura 52.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>BASE DE DATOS</b>							
2	<b>1. ASFALTO DE ESTADOS UNIDOS</b>							
3	Descripción: Factores de emisión para la producción final de asfalto para carreteras en una refinería							
4	Fuente: Young, B.; Morelli, B. y Hawkins, T. (2017). Creation of Unit Process Data for Life Cycle Assessment of Steam Methane							
5	Reforming and Petroleum Refining. Illinois: Franklin Associates.							
6	Año: 2017							
7	Locación: Estados Unidos y división por zonas PADDs							
8								
9								Celda control
10		Zona	Emisiones /(kg <sub>CO2e</sub> /kg <sub>asfalto</sub> )					3
11		PADD 1	0,825					
12		PADD 2	1,498					
13		PADD 3	2,169					
14		PADD 4	1,758					
15		PADD 5	1,614					
16		U.S.A.	1,592					
17		Otro	Colocar dato abajo					
18	<b>2. TRANSPORTE DE ASFALTO</b>							
19	Descripción: Emisiones para buques asfalteros Panamax que arriban al Puerto de Moín, zona del Caribe y América Latina							
20	Fuente: Chatziniolaou, S., Ventikos, N., Bilgili, L., & Celebi, U. (2016). Green Energy and Technology. Switzerland: Springer							
21	International Publishing.							
22	Año: 2016							
23								
24		Sustancia	Emisiones /(kg <sub>sustancia</sub> /año*kg asfalto)					
25		Dióxido de carbono	0,592					
26		Metano	0,0000193					
27		Óxido nitroso	0,00165					
28	TPM: Tonelaje de peso muerto (DWT por sus siglas en inglés)							
30	<b>3. ÍNDICES POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL</b>							
31	Descripción: Índices de potencial de calentamiento global según la IPCC							
32	Fuente: Instituto Meteorológico Nacional. (2019). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. San José: Instituto							
33	Meteorológico Nacional.							
34	Año: Actualidad (2020)							
35	Locación: Global							
36								
37		Sustancia	Potencial de calentamiento global*					
38		Dióxido de carbono	1					
39		Metano	21					
40		Óxido nitroso	310					
41	* Para un horizonte de 100 años							

**Figura 50.** Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte A (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

43 4. FACTORES DE EMISIÓN PARA COMBUSTIBLES EN PAÍS DE ESTUDIO					
44 Descripción: Factores de emisión de GEI para Costa Rica 2019					
45 Fuente: Instituto Meteorológico Nacional. (2019). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. San José: Instituto					
46 Meteorológico Nacional.					
47 Año: 2019					
48 Locación: Costa Rica					
49					
50	Tipo de combustible	Factor de emisión (kg <sub>CO2</sub> /L <sub>combustible</sub> )	Factor de emisión (kg <sub>CH4</sub> /L <sub>combustible</sub> )	Factor de emisión (kg <sub>N2O</sub> /L <sub>combustible</sub> )	Celdas de control
51	Gasolina	2,231	0,000346	0,00002211	1 2 2
52	Diésel	2,613	0,000382	0,00002442	2 2 2
53	Búnker	3,101	0,000433	0,00002769	2 2 5
54	LPG	1,611	0,000139	0,000002745	2 2 2
55	Gasóleo	3,025	0,391	0,023	2 2 2
56					2 2 2
57					1
58 5. FACTORES DE EMISIÓN ANUALES PARA ELECTRICIDAD GENERADA EN PAÍS DE ESTUDIO					
59 Descripción: Se detallan los factores de emisión para los últimos años en Costa Rica					
60 Fuente: Instituto Meteorológico Nacional. (2019). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. San José: Instituto					
61 Meteorológico Nacional.					
62 Año: 2019					
63 Locación: Costa Rica					
64					
65	Año	Factor de emisión (kg <sub>CO2E</sub> /kWh)			Celda control
66	2018	0,0395			1
67	2017	0,0754			
68	2016	0,0557			
69	2015	0,0381			
70	2014	0,1170			
71	2013	0,1300			
73 6. FACTOR DE EMISIÓN PARA ELECTRICIDAD GENERADA CON ENERGÍA SOLAR					
74 Descripción: Se detallan los datos de emisión para energía solar utilizando diferentes fuentes					
75 Fuente: Kommalapati, R.; Kadiyala, Akhil; Shahriar, Tarkik & Huque, Ziaul. (2017). Review of the Life Cycle Greenhouse Gas					
76 Emissions from Different Photovoltaic and Concentrating Solar Power Electricity Generation Systems. Energies, 10, pp. 1-18.					
77 Año: 2017					
78 Locación: Global					
79					
80	Tipo de energía solar	Factor de emisión (kg <sub>CO2E</sub> /kWh)			Celda control
81	Fotovoltaica	0,0502			2
82	Por concentración	0,0495			2

**Figura 51.** Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte B (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)

84 7. POLÍMEROS MODIFICANTES					
85 Descripción: Emisiones para diferentes polímeros comerciales y no convencionales					
86 Locación: Global					
87					
88	Polímero	Descripción	Fuente	Emisiones /(kg <sub>CO2e</sub> /kg <sub>Polímero</sub> )	Celdas de control
89	Caucho sintético	Método IPCC GWP 100 años	Ecoinvent 3	2,880	1
90	Elvaloy	Método IPCC GWP 100 años	Ecoinvent 3	2,220	8
91	PEAD reciclado	Método IPCC GWP 100 años	Ecoinvent 3	0,686	8
92	PET reciclado	Método IPCC GWP 100 años	Ecoinvent 3	0,810	8
93	PPA	Método IPCC GWP 100 años	Ecoinvent 3	1,580	8
94	SBR	Método IPCC GWP	Sorata et. al. (2017)	2,700	2
95	SBS	Método IPCC GWP 100 años	Wildnauer et. al. (2019)	4,000	1
96	Sin polímero	N.A.	N.A.	0,000	1
97	Otro				

**Figura 52.** Base de datos para la herramienta de cuantificación de la huella de carbono de mezclas asfálticas, parte C (Captura de pantalla de la herramienta desarrollada)



## ANEXOS



**Figura 53.** Etapa de pavimentación en la construcción de los tramos en el LanammeUCR  
(Foto tomada por Gabriela Cerdas el 20 de setiembre, 2019)





**Figura 54.** Etapa de compactación en la construcción de los tramos en el LanammeUCR  
(Foto tomada por Gabriela Cerdas el 20 de setiembre, 2019)