



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ANÁLISIS INTEGRAL DE COSTO DE CICLO DE VIDA Y EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN MEZCLAS ASFÁLTICAS USADAS COMO CAPAS DE RODADURA.

Carmelo Enrique Villa Huerta¹, Israel Sandoval Navarro¹, Rey Omar Adame Hernández², Jorge Alarcón Ibarra³,
Jesus Martín del Campo⁴, Ricardo Buzo Romero⁵, Ignacio Cremades Ibáñez⁵

¹ Lasfalto S. de R.L. de C.V. Zapopan, México, evilla@lasfalto.com.mx

² Red Carreteras de Occidente (RCO), Jalisco, México, omar.adame@redoccidente.com

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, jorge.alarcon@umich.mx

⁴ VISE, León, México, jmartin@vise.com.mx

⁵ Surfax, Zapopan, México. ricardo.buzo@surfax.com.mx

Resumen

El estudio se enfocó en la evaluación del desempeño y el análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV) de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles en México. Se analizaron diferentes mezclas con el mismo tipo de agregado, pero asfaltos con diferentes grados de desempeño, para un periodo de análisis de 20, 25, 30, 35 y 40 años. El Valor Presente Neto, se calculó considerando costos iniciales, señalización, fresado y repavimentación, siendo crucial en la selección de capas de rodadura.

Se analizaron las durabilidades promedio de las diferentes mezclas asfálticas usadas como capas de rodadura en la práctica europea y USA, determinadas por importantes instituciones como el NCAT y la EAPA. A pesar de costos iniciales más altos en algunas opciones, se encontró que el costo total era menor, llegando a diferencias de hasta un 40%. Esto resalta que la inversión inicial no es el único factor determinante en la elección de capas de rodadura.

Aborda la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se subraya la importancia de medir impactos ambientales en la toma de decisiones y se introduce el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta valiosa para evaluar la sostenibilidad de procesos y productos.

También se presenta un ejercicio de ACV que busca proporcionar una visión del impacto ambiental de mezclas asfálticas en capas de rodadura. El enfoque cuantifica emisiones de CO₂ equivalente a lo largo del ciclo de vida, excluyendo la etapa de uso, y se basa en datos proporcionados por la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA). Esto facilita la toma de decisiones en proyectos de construcción, considerando aspectos ambientales en la elección de opciones de pavimentación.

El estudio aporta información sobre mezclas asfálticas en pavimentos, abordando aspectos financieros y ambientales en la toma de decisiones en proyectos viales.

Palabras Clave: Costo de ciclo de vida, Análisis de ciclo de vida, sostenibilidad, Durabilidad.

1 Introducción

1.1 El análisis de costo de ciclo de vida (ACCV)

Desempeña un papel crucial en la planificación y reconstrucción de carreteras, considerando aspectos como la inversión inicial, los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo y la selección de materiales para la construcción del pavimento

El análisis se lleva a cabo mediante métodos deterministas o probabilísticos, evaluando aspectos como los costos iniciales, los de mantenimiento, rehabilitación y construcción a lo largo del periodo de análisis.

El cálculo del Valor Presente Neto (VPN) y la comparación entre diversas opciones de mantenimiento son procedimientos fundamentales en los Análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV) [1]. Aunque la ecuación para el VPN en sí misma (ecuación: 1) puede parecer simple, la complejidad radica en la determinación precisa de los insumos necesarios para realizar estos cálculos.

En la práctica, los ACCV se centran en costos específicos del pavimento, excluyendo elementos comunes asociados con la construcción y mantenimiento de carreteras, como puentes y señales. Los cálculos incluyen costos iniciales de construcción, mantenimiento, rehabilitación y los costos del usuario. Además, se introduce el concepto de "valor remanente de la vida de servicio" o "valor remanente", que representa el valor residual de una alternativa de pavimento cuando su durabilidad se extiende más allá del final del periodo de análisis.

El cálculo de la tasa de descuento, una herramienta esencial en ACCV, refleja el incremento en el costo de las cosas con el tiempo, permitiendo la conversión de costos y retornos futuros a valores presentes.

1.2 El análisis de ciclo de vida (ACV)

Teniendo en cuenta también la creciente frecuencia de fenómenos climáticos extremos en México y regiones vecinas, atribuibles al aumento de gases de efecto invernadero, se destaca la necesidad de abordar la sostenibilidad en la construcción y operación de carreteras. Este desafío implica reducir emisiones, hacer un uso más eficiente de la energía y recursos no renovables, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. El concepto de sostenibilidad debe evaluarse a lo largo del ciclo de vida de las carreteras, desde su concepción hasta la demolición. El desafío es convertir la construcción de carreteras en una empresa sostenible, incorporando innovaciones tecnológicas y reduciendo impactos ambientales para asegurar un futuro más sustentable.

2 Durabilidades de mezclas asfálticas como capa de rodadura

Las durabilidades previstas en este trabajo se fundamentan en la aplicación de procesos constructivos que sigan las mejores prácticas. Esto implica que las capas superficiales, especialmente las de rodadura, deberían ser colocadas en carreteras y estructuras de pavimento diseñadas, colocadas y compactadas de manera adecuada.

2.1 Durabilidades en Europa, experiencia en la European Asphalt Pavement Association (EAPA)

Los datos mostrados en el documento de EAPA- Long life asphalt Pavements se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Durabilidades reportadas por la European Asphalt Pavement Association [2]

Mezcla asfáltica	Promedio Durabilidad EAPA (años)
Asphalt Concrete (AC)	14
Asphalt Concrete Tin Layer 30-40 (ACTL 30-40) BBTM	11
Porous Asphalt- OGFC-Mezcla abierta	10
SMA (sin asfalto modificado)	20

2.2 Durabilidades en USA, estudios por el National Center for Asphalt Technology (NCAT)

En el contexto de la durabilidad, se llevaron a cabo estudios centrados en mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt (SMA) y mezclas densas Superior Performing Asphalt Pavement (SUPERPAVE) con asfalto modificado. La obtención de durabilidades implicó el análisis de datos provenientes de sistemas de gestión de pavimentos de 9 agencias de carreteras en Estados Unidos (USA), con el objetivo de comparar su rendimiento en carreteras y pavimentos equivalentes [3].

De las 9 agencias que muestra el estudio, **los datos y durabilidades que fueron tomadas en cuenta para ser adoptadas en este trabajo fueron los obtenidos por las agencias de los estados de: Alabama y Virginia**, estas por ser las que realizan las intervenciones con un índice de servicio más bajo. Es decir, permiten que el pavimento baje sus estándares un poco más en comparación con las demás agencias.

2.2.1 Experiencia de Alabama

En colaboración con el departamento de transporte de Alabama, el National Center for Asphalt Technology (NCAT) presentó datos de 179 secciones de pavimento flexible, de las cuales 33 utilizaban mezcla asfáltica SMA como capa superficial, mientras que 146 secciones empleaban mezcla densa de SUPERPAVE modificada con polímero.

Para evaluar el desempeño, se utilizó un modelo que ajustó primero los datos medidos y luego predijo la durabilidad. En base a este modelo, se proyectaron durabilidades de 16 años para ambas mezclas en el estado de Alabama.

2.2.2 Experiencia de Virginia

Para este estado las durabilidades fueron: 19 años para las capas construidas con SMA y 14.4 años para las mezclas SUPERPAVE modificadas con polímero. Para la obtención de los resultados se analizaron 100 secciones de pavimento de las cuales 46 eran con SMA y 44 con mezcla SUPERPAVE.

2.3 Durabilidades finales

Para este estudio, las durabilidades fueron adoptadas de acuerdo con las experiencias de Estados Unidos y Europa, las durabilidades promedio publicadas por la European Asphalt Pavement Association (EAPA) en el 2017 [2] y de acuerdo con experiencias en USA determinadas por el NCAT, para las mezclas SMA y SUPERPAVE en el 2018 [3]. De acuerdo con las durabilidades promedio de cada documento, las durabilidades obtenidas después de un análisis se observan en la Tabla 2. Diferentes tipos de mezcla con diferentes Performance Grade (PG) de los asfaltos utilizados.

Tabla 2. Durabilidades determinadas en años para cada una de las mezclas asfálticas utilizadas en el análisis de costo de ciclo de vida de este estudio.

Mezcla asfáltica	SMA PG76	SMAPG 64	Densa PG 76	Densa PG 64	CASAAPG76	OGFCPG 76
Durabilidad (años)	22	17	15	8	9	7

3 Estructura de pavimento flexible

En este apartado se proporciona un ejemplo del uso de las capas de rodadura, se presenta una estructura de pavimento hipotética, en la que las rehabilitaciones están previstas que solo se hagan en la última capa asfáltica (capa de rodadura), esta al finalizar la durabilidad de cada una de las opciones. Todas las secciones son diseñadas con una capa de rodadura de 4 cm de espesor colocadas sobre una capa densa de alto módulo con 14 cm de espesor y debajo de esta, una capa absorbadora de tensión de 7cm. Las capas granulares de arriba abajo: base granular de 30 cm, subbase de 35 cm, subrasante de 40 cm y un terreno natural semi-infinito. Las propiedades mecánicas de los materiales se ingresaron con valores estándar en la práctica mexicana y se diseñaron para una vida útil de 30 años, todo en el software “IMT PAVE” del Instituto Mexicano del Transporte.

4 Midiendo la sostenibilidad a través del análisis de costo de ciclo de vida (ACCV)

Este estudio se llevó a cabo recabando información de durabilidades de mezclas asfálticas en Europa y Estados Unidos y los demás datos de entrada son de acuerdo con las prácticas en nuestro país. El objetivo general del ACCV es determinar las diferencias en los VPN’s de las diferentes mezclas. La suposición hecha en el ACCV fue construir un km/carril con una capa de rodadura de 4 centímetros de espesor y 3.5 metros de ancho, usando los costos de fabricación, puesta en obra, colocación y compactación de mezclas asfálticas en México. Además, la tasa de descuento utilizada en promedio es de 10% de acuerdo con lo recomendado por el Instituto Mexicano del transporte [4]. La Tabla 3. Resume los datos de entrada en el ACCV de este trabajo.

Tabla 3. Datos de entrada en el Análisis de Costo de Ciclo de Vida

Tipo de pavimento	Tasa de descuento (%)	Periodo de análisis (años)	Capa de rodadura	Vida de servicio de la capa de rodadura
Pavimento flexible para tráfico mayores a 10 millones de ejes equivalentes	10	20, 25, 30, 35 y 40	SMA PG 76	22
			SMA PG 64	17
			Densa PG 76	15
			Densa PG 64	8
			CASAA PG 76	9
			OGFC PG 76	7

Para realizar una comparación equitativa entre las diferentes capas de rodadura, los costos anticipados futuros, los costos de mantenimiento y los costos de los usuarios, en primera instancia se “descuentan” en el presente para dar cuenta del valor temporal del dinero. Si una alternativa al final del ciclo de vida tiene un valor remanente al final del período de análisis este se descuenta a su valor actual. Para este estudio se determinó el VPN de la construcción inicial, la alternativa de pavimento con el costo de ciclo de vida más bajo (es decir VPN), es típicamente la mejor alternativa. Para cada una de las alternativas (tipo de mezcla), se calculó su VPN con la fórmula económica que se muestra en la ecuación 1.

$$VPN = VP_0 + \sum VF_i * \left[\frac{1}{(1+r)^{n_i}} \right] - VR * \left[\frac{1}{(1+r)^{n_s}} \right] \quad (1)$$

Donde:

VPN= Valor Presente Neto

VP₀= Valor Presente del costo de la primera sobre capa

VF_i = Valor futuro de la capa

VR= Valor Remanente de la capa al final del periodo de análisis

r = Tasa de descuento

n_i= Tiempo necesario para aplicar la primera sobre capa (durabilidad de la capa)

n_s= Periodo de análisis

5 Análisis de resultados (ACCV)

5.1 Periodo de análisis de 20 años

En este análisis se incluye el porcentaje de riego de liga necesario para cada opción y el flete redondo de los equipos de pavimentación, siendo la suma de estos conceptos el costo inicial. Para los costos de la rehabilitación se incluye la construcción de la misma sección (costo inicial) más los costos de señalamiento y control de tráfico, los costos de fresado de 4 cm de espesor y el transporte (flete) de los equipos de construcción a la obra en un radio de 50 km desde la planta de mezclado, las mezclas analizadas son SMA PG 76, SMA PG 64, Densa PG 76, Densa PG 64, Carpeta asfáltica Superficial Altamente Adherida (CASAA), OGFC, este análisis de muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla de datos de entrada en el análisis de costo de ciclo de vida.

Concepto	Unidad	SMA PG 76	SMA PG 64	Densa PG 76	Densa PG 64	CASAA PG 76	OGFC PG 76
Suministro y colocación de mezcla asfáltica 4cm de espesor, incluye riego de liga	m2	\$242	\$216	\$209	\$184	\$187	\$204
Flete redondo de los equipos de tendido y compactación (radio de 50 km)	evento	\$43,859	\$43,859	\$43,859	\$43,849	\$43,849	\$43,849
Costo inicial de construcción: 1km de longitud-3.5m de ancho y 4 cm de espesor	Pesos	\$890,859	\$799,859	\$775,359	\$687,859	\$698,359	\$757,859
Control de tráfico	evento	\$40,935	\$40,935	\$40,935	\$40,935	\$40,935	\$40,935

Fresado: 4 cm de espesor	m2	\$37	\$37	\$37	\$37	\$37	\$37
Fresado de la sección tipo: 3.5 m de ancho, 1 km de longitud y 4cm de ancho	sección	\$129,500	\$129,500	\$129,500	\$129,500	\$129,500	\$129,500
Costo de una actividad de rehabilitación	Pesos	\$1,061,294	\$970,294	\$945,794	\$858,294	\$868,794	\$928,294
Durabilidad	Años	22	17	15	8	9	7
Periodo de análisis	Años	20	20	20	20	20	20
Número de intervenciones en el periodo de análisis	evento	1	2	2	3	3	3
Suma de costos de las intervenciones en el periodo de análisis	Pesos	\$0	\$970,294	\$945,794	\$1,716,588	\$1,737,588	\$1,856,588
Tasa de descuento	Porcentaje	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Valor remanente al final del periodo de análisis	Pesos	\$80,987	\$799,066	\$630,529	\$429,147	\$675,729	\$132,613
VPN	Pesos	\$878,821	\$873,050	\$908,050	\$1,424,870	\$1,334,823	\$1,690,870

5.2 Periodo de análisis de 25, 30, 35 y 40 años

De forma complementaria se analizaron periodos de análisis de 25,30,35 y 40 años. Para el caso de 25 años la tendencia es muy similar a los resultados obtenidos para un periodo de 20 años, las opciones afectadas son la mezcla densa PG 64 y OGFC PG 76, sobre todo en los periodos de análisis de 30 años en adelante debido al número de intervenciones que esos periodos de tiempo contemplan, como se muestra en la Figura 1.

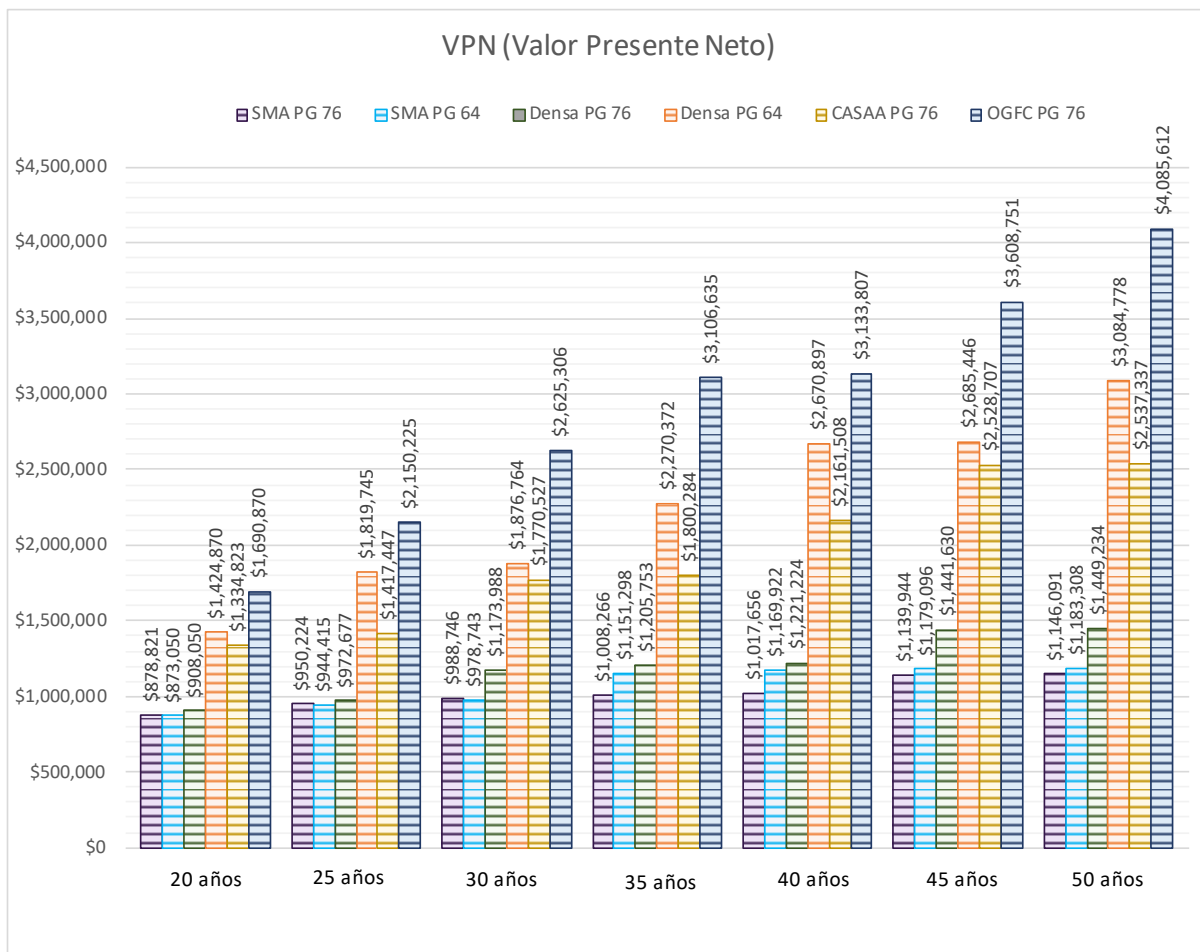


Figura 1. Valores presentes Netos de las diferentes opciones de capa de rodadura en periodos de análisis de 20, 25, 30,35 y 40 años.

6 Costo usuario

El impacto que tiene el costo usuario en la conservación de carreteras es de entre el 15 y 30% del valor presente de cada una de las opciones, cifra importante para tomar en cuenta por la dependencia o Administradora del tramo en estudio [5].

7 Midiendo la sostenibilidad a través del análisis de ciclo de vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una técnica que analiza y cuantifica los impactos ambientales de un producto, sistema o proceso. Este método provee un acercamiento comprensible para evaluar la carga ambiental de un producto o proceso examinando todas las entradas (materiales, energía) y salidas (desperdicios, contaminantes) durante todo su ciclo de vida, desde la producción de las materias primas hasta el final de su vida útil. Para los pavimentos, el ciclo incluye la producción de los materiales, el diseño, la construcción, el uso, el mantenimiento y la rehabilitación y su disposición final.

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se utiliza para evaluar el impacto ambiental de un producto desde su origen (materias primas) hasta su disponibilidad en el lugar de producción (cradle-to-gate). Cuando se aplica específicamente a un producto y su alcance se limita de esta manera, se denomina Declaración Ambiental de Producto (DAP). La Organización Internacional de Estandarización (ISO) establece las reglas y procesos para realizar un ACV, como se detalla en la norma ISO 14040:2006.

Para aplicar estas normas a un proceso o material específico, se utilizan Reglas de Categoría de Producto (RCP), que son guías más específicas desarrolladas por el sector industrial u otras partes involucradas. En el caso de la industria de mezclas asfálticas en México, no existen RCP específicas, pero la National Asphalt Pavement Association (NAPA) en los Estados Unidos ha desarrollado RCP para mezclas asfálticas, que podrían ser referencias para el mercado mexicano.

En Europa, las RCP para mezclas asfálticas varían de país en país, pero la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (EAPA) ha publicado guías para la elaboración de RCP para homologarlas en la Unión Europea y permitir comparativas entre las Declaraciones Ambientales de Producto. Las DAP para productos de construcción en Europa están reguladas por la norma EN 15804:2012 + A2:2019.

Además, el ACV no se limita solo a DAP de productos y plantas de producción específicas; también se puede utilizar para emitir DAP con alcances sectoriales. Por ejemplo, la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA) publicó DAP sectoriales para las mezclas asfálticas más utilizadas en España.

7.1 El ciclo de vida de los pavimentos asfálticos.

La clave para poder tomar buenas decisiones económicas y ambientales en lo que refiere a sistemas de pavimentación es tener un entendimiento claro del ciclo de vida de los pavimentos y en que parte de este ciclo se generan los mayores costos e impactos ambientales más importantes, las etapas de ciclo de vida en pavimentos se muestran en la Figura 2.

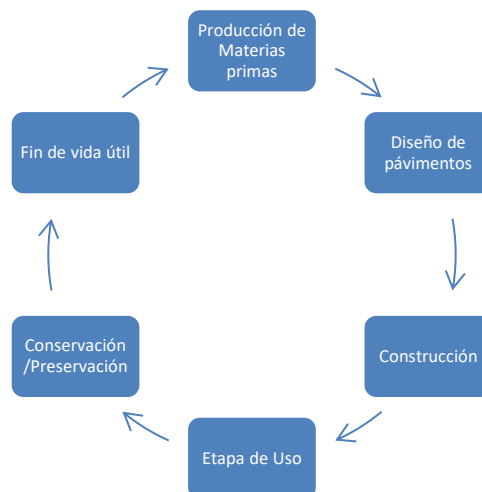


Figura 2. Etapas del ciclo de vida en pavimentos [6].

7.2 El proceso del ACV

El ACV también puede aplicar a ciertas etapas del ciclo de vida, dependiendo de los objetivos y alcances que se planteen al inicio del ACV. El proceso general del ACV es descrito y gobernado por una serie de estándares emitidos por ISO, particularmente de la norma ISO 14044, Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices (ISO 2006b). Acorde a esta norma, el estudio de un ACV consiste en cuatro fases que se describen a continuación y que se muestran en la Figura 3.

1. Definición de los objetivos y alcances.
2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.
3. Análisis de Impacto.
4. Interpretación.

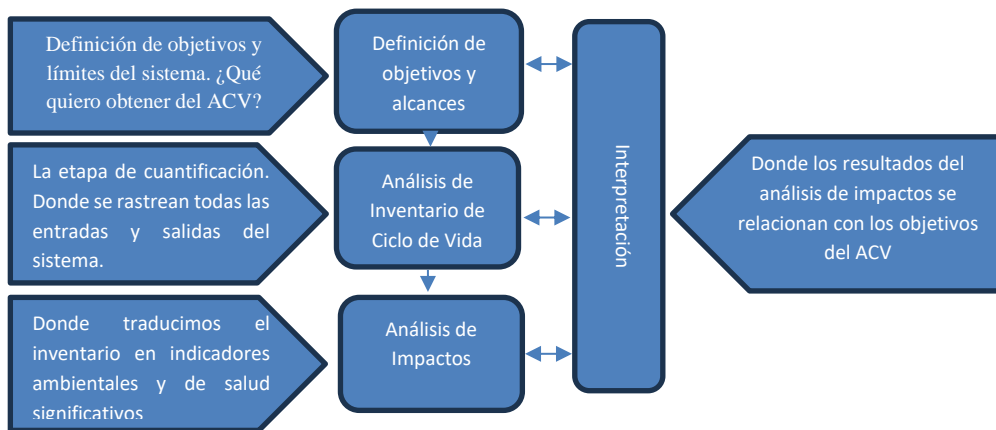


Figura 3. Ilustración del marco del Análisis del Ciclo de Vida acorde a ISO 14044

8 Caso práctico ACV

Con un fin meramente demostrativo, haremos a continuación un caso práctico para la evaluación del impacto ambiental de varias carpetas de rodadura para un proyecto específico. Siguiendo los pasos de la metodología del ACV.

8.1 Definición de alcance y objetivos.

Haremos el ACV para un proyecto de colocación de carpeta de rodadura sobre una carpeta asfáltica nueva o existente en buenas condiciones estructurales. El objetivo del ejercicio es hacer un análisis comparativo de los impactos ambientales sobre un periodo de análisis de 30 años de 4 diferentes tipos de mezclas, todas aplicadas en el mismo grosor (5 cm). Se definen como alcances para este ejercicio la unidad funcional de una tonelada de mezcla asfáltica. Para facilitar el ejercicio se ha definido una distancia de acarreo de la mezcla de 40 km y se ha limitado el análisis de impacto ambiental a su potencial de calentamiento global, medido como kg de CO₂ equivalente por tonelada de mezcla. Del Ciclo de vida de las capas de rodadura, se evaluará su producción, construcción, fin de vida y su valor remanente como material para reciclado. Para este estudio se tomarán los tiempos de vida promedio de las diferentes capas de rodadura publicadas por la EAPA [2] y que se muestran en la Tabla 1.

8.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.

Para esta fase, tomaremos los DAP sectoriales reportados por ASEFMA para las mezclas asfálticas más comunes en España, un concreto asfáltico (AC, mezcla densa), una mezcla discontinua con alto contenido de vacíos (BBTM), una mezcla abierta (OGFC) y una mezcla discontinua SMA. En Europa, los DAP para los productos de construcción no solo toman los parámetros de producción, sino que lo extienden a los costos ambientales de su demolición y disposición o en dado caso de su valor residual como producto reciclado o reutilizado. La Tabla 5. Muestra los valores de kg de CO₂ equivalente para cada una de las diferentes mezclas consideradas en este estudio. Los costos ambientales de la transportación y colocación de la mezcla se obtuvieron de los reportados por Aceves et al para un pavimento colocado en México y calculado con la metodología de ACV y el software “SIMAPRO” [7, 8].

Tabla 5. Potencial de calentamiento global medido como kg de CO₂ equivalente para varias capas de rodadura (ASEFMA, 2023 y Aceves, 2020).

	A1 - A3			A4 - A5		C1 - C4				D	Total (kg CO ₂ eq) por tonelada de mezcla
	Etapa de Producción			Etapa de Construcción		Etapa de fin de vida útil					
	A1	A2	A3	A4	A5	C1	C2	C3	C4		
	Extracción	Transporte	Producción	Transporte al sitio de obra	Instalación	Demolición	Transporte para procesamiento de residuos o disposición	Procesamiento de desechos	Disposición de desechos	Beneficios potenciales del reuso, reciclado y/o recuperación de energía más allá de los límites del sistema	
AC	35.8	7.4	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-13.1	76.3
BBTM	43.8	12.9	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-15.9	87.0
OGFC	41.6	11.3	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-14.2	84.9
SMA	54.2	14.2	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-19.2	95.4

Como se observa en la Tabla 5. Las mezclas con más contenido de asfalto (SMA) y que requieren agregados de mayor calidad, tienen una mayor generación de CO₂ por tonelada de mezcla que las mezclas densas. Para su potencial valor de reuso o reciclado, el valor absoluto para las mezclas SMA tiene un mayor valor que las mezclas densas dada las mejores características de sus componentes.

Al hacer la evaluación de ciclo de vida para el periodo definido de 30 años, se observa que la mezcla densa convencional se deberá de reponer al año 14 y al año 28, quedando un valor remanente al año 30 equivalente al 85.7% de su impacto como carpeta nueva. Para la mezcla tipo BBTM, esta se deberá reemplazar en los años 11 y 22 quedando en el año 30 con un valor remanente de 27.2% de su impacto como carpeta nueva. En el caso de la mezcla abierta Porous Asphalt (OGFC), esta se deberá reponer en los años 10 y 20, quedando con un valor remanente del 0% en el año 30 (sería el año en que se deberá reponer nuevamente). Finalmente, la mezcla asfáltica tipo SMA se repondrá solo una vez en el año 20, quedando con un valor remanente del 50% al año 30. Los valores remanentes se restan de los impactos de calentamiento global totales para cada tipo de mezcla. Los resultados de los impactos por tipo de mezcla se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Potencial de calentamiento global medido en kg de CO₂ equivalente para 4 mezclas asfálticas en un periodo de 30 años (se marcan en verde la construcción original y las reposiciones de carpeta).

	Durabilidad (años)	Año								Residual	Total (kg CO ₂ eq) por tonelada
		0	10	11	14	20	22	28	30		
AC	14	76.3	0.0	0.0	76.3	0.0	0.0	76.3	0.0	65.4	163.5
BBTM	11	87.0	0.0	87.0	0.0	0.0	87.0	0.0	0.0	23.7	237.2
OGFC	10	84.9	84.9	0.0	0.0	84.9	0.0	0.0	0.0	0.0	254.7
SMA	20	95.4	0.0	0.0	0.0	95.4	0.0	0.0	0.0	47.7	143.1

Para este estudio de ACV no se consideró las emisiones que se generan durante el uso de la carretera. Para una carretera o autopista de alto tráfico (>10 millones de ejes equivalentes), el consumo más importante de recursos y las mayores emisiones suceden durante su uso, un adecuado mantenimiento que reduzca los valores de Índice de rugosidad internacional (IRI) por debajo de 2.7 m/km durante la vida útil de la carpeta de rodadura, tendrá un impacto más importante en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que otras opciones como el incremento de RAP o el uso de mezclas tibias durante la construcción y rehabilitación [9].

En la Figura 4. se muestra de manera muy clara la importancia de la durabilidad en la sostenibilidad de los pavimentos.

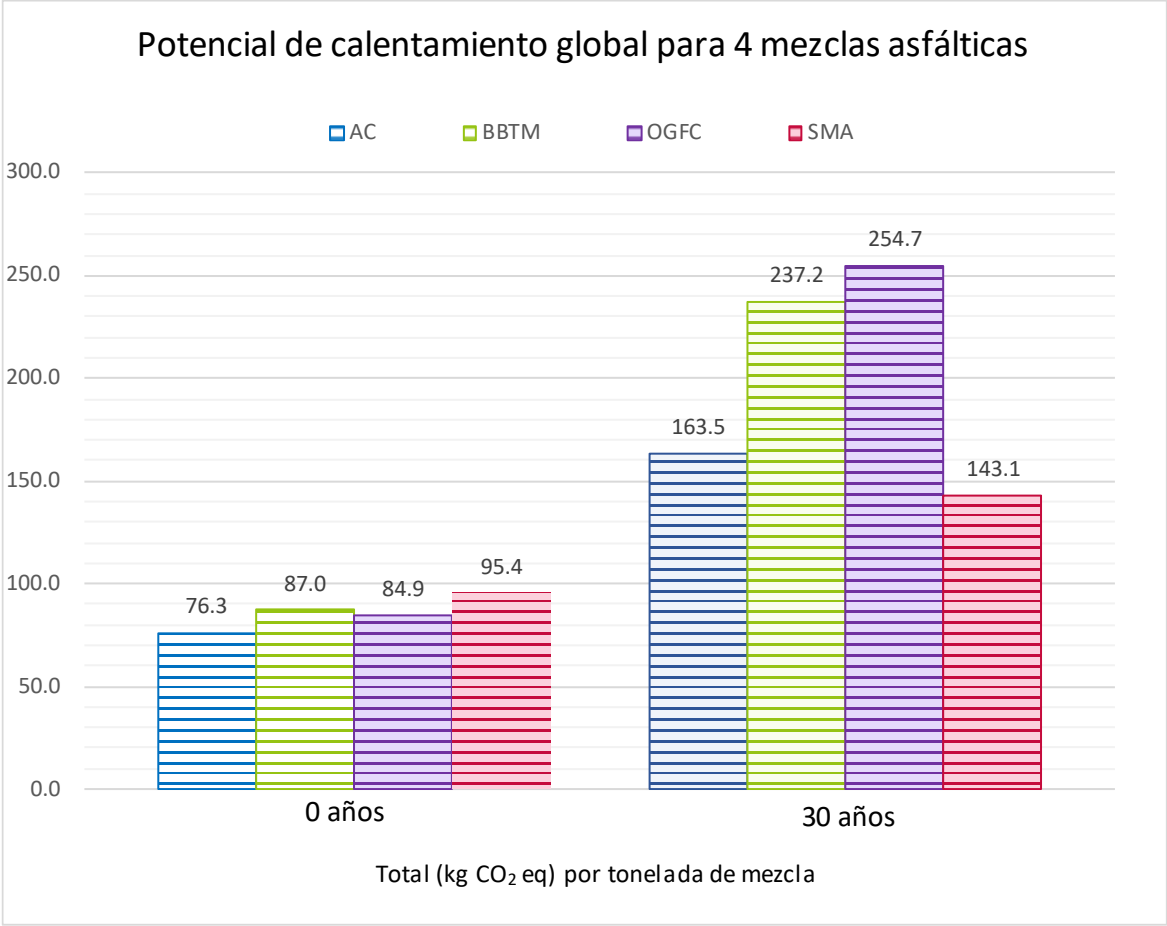


Figura 4. Comparación de los impactos al calentamiento Global medido en kg de CO₂ equivalente para 4 tipos de mezclas asfálticas usadas como carpetas de rodadura en el año 0 (recién construidas) y en el año 30

9 Conclusiones

A pesar de contar con uno de los costos iniciales más elevados, las mezclas SMA cuentan con el Valor Presente Neto más bajo, es decir es la mejor opción en periodos de análisis por encima de los 20 años; siendo mejor el SMA PG 76 en el periodo de análisis de 35 años en adelante, debido al número de intervenciones requeridas en esos periodos de análisis.

La mezcla SMA PG 64 comparada con la densa PG 64, CASAA PG 76 y OGFC PG 76 (mezclas con el menor costo inicial, pero con los costos de ciclo de vida más altos), el costo de ciclo de vida (VPN), representa un ahorro de entre un 39 hasta un 48 %. Mientras que, con respecto a una mezcla densa SUPERPAVE PG 76, los costos de ciclo de vida son muy parecidos, sin embargo, el coeficiente de fricción es un parámetro importante, parámetro en el que las mezclas SMA presentan mejores valores además de la poca susceptibilidad al ahuellamiento comparadas con las mezclas densas SUPERPAVE, por lo que la mezcla SMA es la mejor opción.

Las mezclas SMA PG 76 y PG 64 junto con la Mezcla densa son las mejores opciones desde el punto de vista de un Análisis de Costo de Ciclo de vida, sin embargo, las mezclas densas en algunos países no se recomiendan como capa de rodadura, razón que debe tomarse en cuenta.

El Análisis de Ciclo de vida es una metodología de evaluación de sostenibilidad que es útil para la evaluación de los impactos ambientales que genera un producto o proceso. Es un proceso robusto, bien establecido, documentado y normado por la ISO, en las normas de la serie ISO14040.

EL ACV es la herramienta que se utiliza para la elaboración de las Declaraciones Ambientales de Producto, una herramienta de enorme utilidad para conocer e informar de la carga ambiental de un producto que se utiliza como insumo de procesos más sofisticados o amplios. Junto con el Análisis de Costo de Ciclo de Vida, da al tomador de decisiones información valiosa desde el punto de vista económico y de impacto ambiental, y en ocasiones también de la conveniencia social.

Los pavimentos más durables (SMA y mezclas densas) son a la larga los que menos impactos generan al medio ambiente, ya que su periodo de reposición es más largo, al igual que requieren menor mantenimiento, aun cuando puedan generar más emisiones al construirse por primera vez.

Mientras que el Análisis de Costo de Ciclo de Vida se centra en los aspectos económicos a lo largo de la vida de un activo, el Análisis de Ciclo de Vida se centra en evaluar los impactos ambientales. Ambos enfoques son valiosos en diferentes contextos y pueden utilizarse de manera complementaria para una toma de decisiones más completa y sostenible.

10 Referencias

- [1] Fan Gu, Nam Tram. May. NCAT Report 19-03 *Best Practices for determining life cycle costs of asphalt pavements*, 2019.
- [2] *Long-Life Asphalt Pavements* – Technical versión (Europa, 2007).
- [3] Fan Yin, Randy west. NCAT Report 18-03 *Performances and life cycle cost benefits of Stone matrix*, August 2018.
- [4] Solorio, R., Garnica, P., Ortega, M., Hernández, R., 2017. *Metodología basada en el HDM-4 para la selección de metas de desempeño en la red federal de carreteras*.
- [5] Adame Hernández, R. O., Alarcón Ibarra, J., Martín del campo, J., & Cremades Ibáñez, I. (2021). *Análisis de costo de ciclo de vida de mezclas asfálticas usadas como capas de rodadura*. *Asfáltica*, 27 - 40.
- [6] Harvey J., Meijer J., Ozer Hasan, Al-Qadi I. L., Saboori, A. and Kendall, A (2016) *Pavement Life Cycle Assessment Framework, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HIF-16-014, Washington, DC*.
- [7] Aceves-Gutiérrez, H. López-Chávez, O. Mercado-Ibarra, S. Magdalena, Arévalo-Razo, J.L. *Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO*, Instituto Tecnológico de Sonora, *Revista de Energías Renovables*, Junio, 2020 Vol. 4 No. 12
- [8] Peña J.L. *Métricas de análisis de ciclo de vida para el sector de la pavimentación. Los DAP Sectoriales de ASEFMA. Principales conclusiones. XIII Jornada Técnica de ASEFMA, 13 de junio de 2023*.
- [9] Kendall, A. Harvey, J. Butt, A. *Greenhouse Gas Reduction Opportunities for Local Governments: Development of Supply Curves, Co-Benefit Estimation, and Equity Indicators*. University of California, Davis, 2021.