



Análisis de Ciclo de Vida, su aplicación en la medición de la sostenibilidad en pavimentos asfálticos.

Ricardo Buzo¹, Ignacio Cremades²

1 SURFAX, S.A. de C.V., Zapopan, México, ricardo.buzo@surfax.com.mx

2 SURFAX, S.A. de C.V., Zapopan, México, ignacio.cremades@surfax.com.mx

Resumen

Los informes presentados por el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) [1] no dejan lugar a duda, enfrentamos una Emergencia Climática Global. Es necesario que todos los gobiernos, instituciones y compañías pongan en marcha acciones para mitigar el calentamiento global y reduzcan de manera drástica las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en sus actividades.

El primer paso para poder establecer objetivos y medir los avances en sostenibilidad es la medición de los impactos ambientales de las actividades y procesos más relevantes de cualquier institución e incluir estas mediciones en la evaluación de proyectos y en la toma de decisiones. Hay herramientas de medición de la sostenibilidad, todas con fortalezas y debilidades, y pueden implementarse solas o en combinación.

El Análisis de Ciclo de Vida ACV ha demostrado ser una técnica valiosa para los fines de medición de la sostenibilidad de un proceso o producto, ofrece un acercamiento comprensible para evaluar la carga ambiental de un producto o proceso mediante el análisis de todas las entradas y salidas durante el ciclo de vida, desde las materias primas, los procesos, fin de su vida útil y disposición final. Este estudio sistematizado identifica donde se encuentran los mayores impactos ambientales, y donde se pueden hacer las mejoras a los procesos que resulten más significativos.

Este artículo plantea de una manera resumida y entendible el proceso para la implementación del Análisis de Ciclo de vida en la evaluación de proyectos de construcción de carreteras. También se hace un planteamiento simple de cómo se puede utilizar la información obtenida para la evaluación comparativa de tecnologías de pavimentación y como puede utilizarse para la implementación de acciones de alto impacto en la reducción de GEI en políticas, requerimientos y especificaciones de proyectos para la construcción, conservación y/o rehabilitación de pavimentos.

Palabras Clave: Sostenibilidad, Carreteras Sostenibles, Análisis de ciclo de vida, Mezclas asfálticas

1 Introducción, punto de partida en México.

Todos los días atestiguamos los cada vez más acentuados fenómenos climáticos que afectan a nuestro país, y a las regiones de Norte, Centro América y el Caribe, originados por el incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Es ya un tema habitual hablar de ondas de calor, la falta de lluvias en los meses de invierno y a los prolongados meses de sequía, que generan escasez de agua en extensas partes del territorio mexicano y que generan condiciones propicias para los incendios forestales que tanto nos han afectado como país. Estos son solo algunos de los ejemplos de cómo el calentamiento global está afectando nuestro entorno y nuestra vida diaria.



Tenemos ante nosotros la oportunidad y el reto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y de poder hacer un uso más racional de la energía y los recursos no renovables asociados a la construcción y operación de carreteras en México, a la vez que se cumplen con los criterios sociales y económicos de las carreteras, alienados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuesto por la Organización de la Naciones Unidas en su agenda 2030.

El concepto “Sostenible” es uno extremadamente complejo, pues no se mide en una sola dimensión, ni se evalúa en un solo momento en el tiempo. Las características de sostenibilidad de un proyecto de autopista deben de ser evaluadas y consideradas a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la concepción, hasta la construcción, operación y mantenimiento y su demolición y disposición final.

En los últimos años ha habido una continua difusión de los conceptos y objetivos de sostenibilidad en la industria de construcción de carreteras e infraestructura vial en México, con el objetivo de incrementar la calidad, seguridad y durabilidad de las carreteras, así como impulsar la innovación y las tecnologías que permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (mezclas tibias, uso de RAP, uso de emulsiones asfálticas, etc.). Pero aún queda mucho por hacer para asegurar que vamos en el camino de construir carreteras sostenibles. Nuestro mayor reto es que esta se ha convertido en una carrera contra el tiempo. Cada día que pasa hace más difícil revertir o contener el calentamiento global.

2 Midiendo la Sostenibilidad.

La medición de la sostenibilidad es el primer paso para establecer objetivos, medir los progresos y la eficacia de las estrategias implementadas o de las acciones tomadas. Existen varias herramientas y métodos disponibles para definir y evaluar la sostenibilidad de un pavimento, todas ellas tienen debilidades y fortalezas y pueden ser usadas individualmente o en combinación. Las cuatro herramientas o métodos más relevantes se describen a continuación:

2.1 Evaluaciones de desempeño.

La evaluación de desempeño involucra la evaluación de un pavimento con relación a su función esperada. El desempeño se evalúa a través de indicadores críticos y con base a un valor considerado el estándar. Por ejemplo, si el tiempo de vida esperado para la carpeta de rodadura en un pavimento asfáltico con la tecnología estándar actual es de 10 años, el valor proyectado para una tecnología de carpeta de rodadura alternativa estará basada en estos 10 años de la alternativa actual. La percepción más común sería que la alternativa debe de desempeñarse igual o mejor que el estándar actual (aunque esta puede ser una visión demasiado estrecha, ya que no considera otros beneficios adicionales). El desempeño también puede ser medido con indicadores físicos específicos, tales como capacidad estructural, mediciones de resistencia al deslizamiento, el Índice de Irregularidad o IRI, etc. Este indicador debe de ir acompañado con el mecanismo de comportamiento que lo liga al desempeño esperado, por ejemplo, la resistencia al deslizamiento con la seguridad o el índice de irregularidad con la comodidad y el ahorro de combustible en la conducción.

2.2 Análisis de costo de ciclo de vida ACCV (Life-Cycle Cost Analysis LCCA).



El análisis de costo de ciclo de vida es una técnica de análisis que evalúa el costo económico total de una opción de inversión en pesos constantes en un periodo de tiempo definido. Por lo tanto, su principal uso es evaluar el componente económico de un proyecto o de una alternativa de construcción. Este análisis parte de la suposición de que cualquiera de las alternativas ofrece el mismo desempeño y beneficios y que la única diferencia a considerar es el costo. Este análisis no toma en cuenta los componentes sociales o medio ambientales de la sostenibilidad, a menos que estas características puedan traducirse a un beneficio económico cuantificable.

La Federal Highway Administration (FHWA) es una de las agencias que anima al uso del Análisis de Costo de Ciclo de Vida como una herramienta para la toma de decisiones. Actualmente se cuentan con Software para la cuantificación del Costo de Ciclo de Vida en Pavimentos, entre ellos el Programa RealCost de la FHWA publicado en 2011.

2.3 Sistemas de Valoración de la Sostenibilidad (Sustainability Rating Systems)

Los sistemas de valoración de la sostenibilidad son esencialmente una lista de atributos o buenas prácticas que tienen un impacto en la sostenibilidad, emparejado con una escala de unidades de medida, usualmente un sistema de puntos, que cuantifican los impactos relativos de cada buena práctica a la sostenibilidad. En estas listas, se cuantifican atributos tales como toneladas de material reciclado utilizado, contaminantes en el agua de los escurrimientos, energía consumida y se traduce a un cierto puntaje en una escala que después se puede sumar entre ellos. En su forma más simple, cada buena práctica ligada a la sostenibilidad tiene el mismo peso. En sistemas más complejos, cada atributo o buena práctica se pondera en función de las prioridades del proyecto o en relación con su impacto en uno o varios objetivos de sostenibilidad, esta metodología puede ayudar a seleccionar las mejores prácticas que más impactan para un presupuesto dado o limitado.

Existen sistemas de medición para carreteras sostenibles en el mercado, algunas tienen orígenes académicos, mientras que otras han sido impulsadas por autoridades, como los departamentos de transportes locales en los Estados Unidos. Ejemplos de sistemas de valoración son el INVEST (desarrollado por la FHWA), Greenroads (desarrollado por la Greenroads Foundation) y Envision (desarrollado y administrado por The Institute for Sustainable Infrastructure).

2.4 Análisis de Ciclo de Vida ACV (Life Cycle Assessment LCA).

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.

Cuando la metodología del ACV se limita a un producto y su alcance se define desde su origen (materias primas) hasta su disponibilidad en el lugar de producción (cradle-to-gate), el ACV se denomina Declaración Ambiental de Producto DAP (Environmental Product Declaration o EPD) y puede ser utilizado como información de alimentación para ACV más elaborados o de mayor alcance.



El proceso y reglas para realizar un ACV están definidas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) en su familia de normas 14040 (ISO 14040:2006 Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia). Estas normas de referencia son muy amplias, por lo que se requiere una guía más precisa para su aplicación a un proceso o material específico. Esta guía es normalmente desarrollada por el sector industrial y/u otras partes involucradas (Asociaciones, autoridades, etc.) y se les nombra Reglas de Categoría de Producto RCP (Product Category Rules o PCR por sus siglas en inglés) y son la base para que las Declaraciones Ambientales de Producto sean comparativas, ya que se desarrollan bajo los mismos principios. Estas RCP se revisan cada 5 años. Hoy en día, no existe para la industria de mezclas asfálticas para la construcción de carreteras en México reglas de categoría de producto, sin embargo, la National Asphalt Pavement Association (NAPA), desarrolló en 2017 las Reglas de Categoría de Producto para mezclas asfálticas para los Estados Unidos, su versión 2.0 publicada en 2022 amplía su validez para Estados Unidos y Canadá. Esta RCP se pueden usar como referencia para el mercado mexicano. La versión 2.0, emitida en abril de 2022 es válida hasta marzo de 2027.

Las reglas de categoría de producto para las mezclas asfálticas en Europa varían de país en país. En un esfuerzo para homologar los RCP para los diferentes países de la Unión Europea y así poder hacer comparativas las Declaraciones ambientales de producto, la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (EAPA) publicó en mayo del 2017 guías para la elaboración de Reglas de Categoría de Productos para mezclas asfálticas para el mercado europeo. La emisión de las DAP para productos de construcción en Europa (y por lo tanto también para las mezclas asfálticas) están regulados por la norma EN 15804: 2012 + A2:2019

El ACV es un campo de la ciencia que aún esa evolucionando, sin embargo, ha demostrado ser de valor en el mundo real durante las últimas dos décadas, ayudando a fabricantes, compañías constructoras, gobiernos y otros grupos, a identificar sus impactos ambientales, definir que es ambientalmente importante para ellos e implementar acciones y estrategias para reducir sus impactos ambientales de relevancia. Un número cada vez mayor de industrias están creando sus Declaraciones Ambientales de Producto basados en el ACV, para informar del desempeño ambiental de sus productos a los consumidores y al mercado en general. Es también un diferenciador en el mercado y un indicador del compromiso ambiental de las empresas.

Aunque los DAP normalmente se realizan para un producto y una planta de producción en específico, el ACV también puede usarse para emitir DAP con alcances sectoriales, es decir, a través de un análisis de las condiciones y acceso a las materias primas, costos de energía y transportación, es posible hacer DAP para un producto en cierta región, estos datos permiten hacer evaluaciones comparativas a las diferentes partes involucradas para una mejor selección de sus opciones. En fechas recientes la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA) publicó las DAP sectoriales para las mezclas asfálticas más utilizadas en España en un esfuerzo para cumplir su objetivo de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI o GHG por sus siglas en inglés) en un 55% para el año 2030.

Cada una de las cuatro herramientas descritas anteriormente ofrece beneficios únicos para la evaluación de la sostenibilidad. La evaluación por desempeño es un método que se usa hoy en día para la evaluación técnica y desde el punto de vista de la ingeniería del desempeño de las opciones de pavimentación y normalmente se comparan contra un estándar o norma aceptada. Los Análisis de Costo de Ciclo de Vida, se usan cada vez más para evaluar los costos de una o varias opciones de pavimentación en el largo plazo, sobre todo cuando existe la necesidad de respaldar las

decisiones de inversión. Los sistemas de valoración de la sostenibilidad son cada vez más usados en la construcción, sobre todo en la edificación (por ejemplo, el sistema LEED) por ser sistemas más fáciles de entender y de emplear, y finalmente el Análisis de Ciclo de Vida es una tecnología de evaluación con una base bien establecida (la familia de normas ISO 14040) y necesaria para la emisión de DAP.

3 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. Una vez entendido, la implementación de estrategias de sostenibilidad puede reducir estos costos e impactos. Este documento se enfoca en el uso del ACV como herramienta para la toma de decisiones en sistemas de pavimentación a través de la cuantificación de impactos ambientales a través del ciclo de vida de los pavimentos, por lo que la descripción del ciclo se hará con el enfoque de aplicarlo al ACV.



Figura 1. Etapas del ciclo de vida en pavimentos [4].

- 3.1 Producción de materiales: Esta etapa incluye todos los procesos involucrados en la adquisición y procesamiento de materiales para la pavimentación. Incluye la extracción de agregados, extracción de petróleo, la refinación de asfalto, el acondicionamiento, el transporte al lugar de producción y el mezclado.
- 3.2 Diseño: Esta etapa se refiere al proceso de identificar los requerimientos estructurales y funcionales del pavimento para ciertas condiciones geográficas y de tránsito (temperaturas de uso, climas, condiciones del terreno, tráfico estimado, estructura del pavimento existente, etc.) así como la determinación de la composición estructural y materiales requeridos.
- 3.3 Construcción. Esta etapa incluye todos los procesos y equipos asociados a la construcción del pavimento. Se incluye el proceso de transporte del sitio de producción al sitio de construcción.
- 3.4 Etapa de uso. Esa etapa refiere al periodo durante el cual el pavimento estará en servicio, e interactuando con vehículos y el ambiente.
- 3.5 Conservación/Preservación. Estas son las actividades que se realizan a través de la etapa de uso del pavimento para mantener su nivel de servicio. Esta etapa puede incluirse como parte de la etapa de uso.

3.6 Fin de vida útil. Se refiere a la disposición final y al reúso subsecuente, procesamiento, o reciclado del pavimento cuando ha alcanzado el final de su vida útil.

4 El proceso del ACV.

El proceso del ACV invita a los evaluadores a usar un punto de vista de sistema, que incluya el ciclo de vida completo de un producto o proceso (de su cuna a su tumba). Sin embargo, el ACV también puede aplicar a ciertas etapas del ciclo de vida, dependiendo de los objetivos y alcances que se planten 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 2:

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

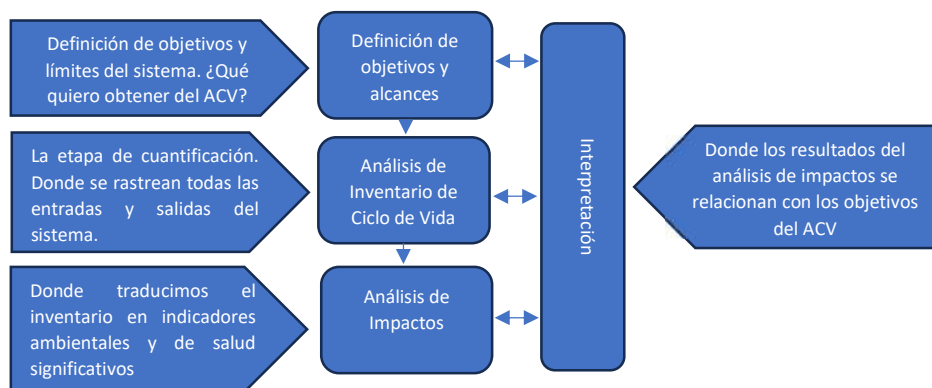


Figura 2. Ilustración del marco del Análisis del Ciclo de Vida acorde a ISO 14044

4.1 Definición del alcance y objetivos.

La primera fase de un ACV es la definición de los alcances y objetivos. Esto permite determinar los límites del estudio y definir el tipo de estudio a realizar y el énfasis en la precisión de la información de soporte. Los objetivos normalmente se establecen en función de las necesidades ambientales, las regulaciones y las políticas. El alcance define que etapas del ciclo de vida y que partes del proceso se incluyen en los límites del estudio y define la calidad requerida de los datos.

Por ejemplo, para la Declaración Ambiental de Producto de una mezcla asfáltica, se define la unidad funcional como una tonelada de mezcla, limitada a una planta particular, en una ubicación geográfica, y solo para la etapa de producción, sobre un periodo de tiempo de tres años, poniendo como año base el 2019. Estos límites del estudio estarían indicados por el cuadro verde en la figura 3.



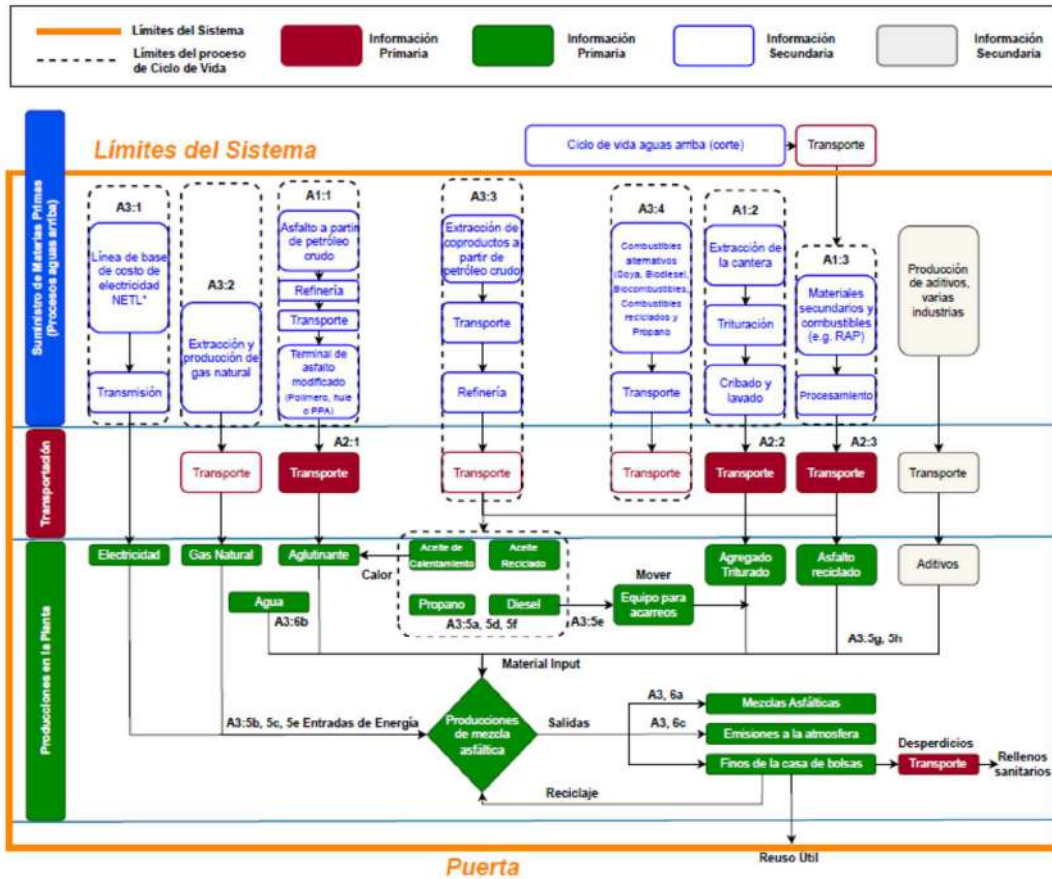
Información del Análisis de Trabajos de Construcción														Información adicional opcional más allá de los límites del sistema.	
Información del Ciclo de Vida de Trabajos de Construcción dentro de los límites del Sistema													D		
A1 - A3			A4 -A5		B1- B7					C1 - C4					
Etapa de Producción			Etapa de Construcción		Etapa de Uso					Etapa de fin de vida útil					
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	Beneficios potenciales del reúso, reciclado, y/o recuperación de energía más allá de los límites del sistema	
Extracción	Transporte	Producción	Transporte al sitio de obra	Instalación	USO	Mantenimiento (Incluye la producción, transporte y disposición de los materiales)	Reparación (Incluye la producción, transporte y disposición de los materiales)	Reemplazar (Incluye la producción, transporte y disposición de los materiales)	Acondicionar (Incluye la producción, transporte y disposición de los materiales)	Demolición	Transporte para procesamiento de residuos o disposición	Procesamiento de desechos	Disposición de desechos		
					B6 Uso de energía durante la operación										
					B7 Uso del agua durante la operación										

Figura 3. Etapas comunes de un Ciclo de Vida y sus módulos de información para productos de construcción. Adaptado del ISO 21930. Se marcan los límites para una Declaración ambiental de producto de una mezcla asfáltica.

4.2 Análisis de inventario de ciclo de vida.

En esta fase se enlistan, se identifican y cuantifican todas las entradas de material, energía y recursos, y las salidas de desperdicios, contaminación y productos secundarios. Para realizar un análisis de inventario, se establece un modelo del proceso con todas las conexiones entre las diferentes etapas, las entradas y salidas y los subproductos o residuos de cada etapa y sus conexiones si es que se reutilizan o se reprocesan en otra etapa. Estos datos en su conjunto se le denominan Inventario de Ciclo de Vida (ICV o LCI por sus siglas en inglés) Para una planta de mezcla asfáltica típica, los flujos de materiales incluyen: consumo de energía en términos de electricidad, gas natural, diésel o biocombustible; materias primas en forma de agregados, cemento asfáltico, aditivos y polímeros, y flujos de salida como mezclas asfálticas, material fuera de especificaciones, emisiones a la atmosfera y desperdicios. Típicamente, todos estos insumos se rastrean hasta su origen, por ejemplo, en el caso de los agregados se remonta a la cantera y al proceso de extracción, trituración y selección, en el caso del gas, a su proceso de obtención, etc. Los datos para estos procesos se pueden obtener de varias fuentes, incluyendo información pública, información comercial disponible, e información obtenida de los promedios de consumo y de emisiones de una planta o proyecto específico. En la práctica, es común el uso de datos de varias fuentes. Los datos obtenidos deben de ajustarse en función de los alcances del ACV. Sin importar que tipo de datos se utilice, es importante reportar la fuente, el tipo de datos y su calidad, de manera que se identifiquen aquellos que tienen más relevancia o influencia en las conclusiones del estudio. En la figura 5 se muestran las entradas y salidas del proceso de fabricación de mezclas asfálticas acorde a las Reglas de Categoría de Producto para mezclas asfálticas de la NAPA [9]

Figura 5. Límites de un sistema para la evaluación de ACV de una mezcla asfáltica (Cuna a la puerta) acorde a las Reglas de Categoría de Producto de mezclas asfálticas de la NAPA [9].



*Estudio de costo ambiental base de producción de energía eléctrica de plantas de generación que consumen combustibles fósiles. National Energy Technology Laboratory

4.3 Evaluación de los Impactos.

La evaluación de los impactos de ciclo de vida es la tercera fase de un ACV. El propósito de este análisis es desarrollar un mejor entendimiento del Inventario de Ciclo de Vida al traducir los flujos de inventarios a impactos ambientales y a la salud humana. Estos impactos se clasifican en:

- Agotamiento de recursos
- Impactos a la salud humana
- Impactos a la naturaleza (ecosistemas)

Los ACV incluyen una selección de categorías de impacto que son más relevantes para los objetivos específicos y el alcance del estudio, y pueden definirse desde un enfoque muy angosto en energía y en emisiones relacionadas a la energía, hasta un set amplio de categorías de impacto. Para términos de las DAP, podemos tomar los que sugiere la EAPA y que se enlistan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Parámetros que describen los impactos ambientales.



Categoría	Parámetro	Unidad (expresado por unidad funcional o por unidad declarada)
Calentamiento Global	Potencial de calentamiento global, GWP:	kg CO ₂ equivalente
Agotamiento de Ozono	Potencial de agotamiento de la capa de ozono en la estratosfera, ODP	kg CFC 11 equivalente
Acidificación del suelo y del agua	Acidificación potencial de suelo y el agua, AP:	kg SO ₂ equivalente
Eutrofización	Eutrofización potencial, EP;	kg (PO ₄) ⁻³ equivalente
Creación Fotoquímica de Ozono	Formación potencial de ozono a nivel de la Troposfera POCP;	kg Etano equivalente
Agotamiento de recursos abióticos (elementos)	Agotamiento potencial de recursos abióticos (ADP Elements)	kg Sb equivalente
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	Agotamiento potencial de recursos abióticos de recursos fósiles (ADP - Fossil fuels)	MJ, valor calórico neto

Tabla 2. Parámetros que describen el uso de recursos.

Parámetro	Unidad (expresado por unidad funcional o por unidad declarada)
Uso de energía primaria renovable excluyendo los recursos energéticos renovables primarios usados como materia prima.	MJ, valor calórico neto
Uso de recursos energéticos primarios renovables usados como materia prima.	MJ, valor calórico neto
Uso total de recursos energéticos primarios renovables (recursos de energía primaria y recursos de energía primaria usada como materia prima)	MJ, valor calórico neto
Uso de energía primaria no renovable excluyendo los recursos energéticos no renovables primarios usados como materia prima.	MJ, valor calórico neto
Uso de recursos energéticos primarios no renovables usados como materia prima	MJ, valor calórico neto
Uso total de recursos energéticos primarios no renovables (recursos de energía primaria y recursos de energía primaria usada como materia prima)	MJ, valor calórico neto
Uso de materiales secundarios	kg
Uso de combustibles secundarios renovables	MJ, valor calórico neto
Uso de combustibles secundarios no renovables	MJ, valor calórico neto
Uso neto de agua potable	m ³

4.4 Interpretación.

La interpretación es la fase final del ACV donde los resultados son resumidos y analizados para la emisión de conclusiones y recomendaciones para los tomadores de decisiones, acorde a los objetivos definidos y los alcances planteados.

La norma ISO 14044 establece que los estudios de ACV sean reportados de manera transparente, para que los lectores pueden revisar los objetivos, alcances y conclusiones del estudio. La norma también establece que se requiere de una revisión independiente de los estudios de ACV que comparen alternativas. Un panel de revisión de tres expertos se convoca para ese propósito.

5 Caso práctico.

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.



5.1 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 y con una vida remanente mínima de 40 años. 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 [5] y que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Durabilidades reportadas por la European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2007) [5]

Tipo de Mezcla asfáltica	Durabilidad promedio EAPA (años)
Asphalt Concrete(AC) o mezcla densa	14
Asphalt Concrete Tin Layer 30-40 (ACTL 30-40) BBTM	11
Porous Asphalt – OGFC – Mezcla abierta	10
SMA (sin asfalto modificado)	20

5.2 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 (PA) 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 4 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 [6, 7].

Tabla 4. 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 reúso, 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	76.28
BBTM	43.8	12.9	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-15.9	86.98
PA	41.6	11.3	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-14.2	84.88
SMA	54.2	14.2	20	3.2	13.1	7.6	0.6	0.6	1.1	-19.2	95.38



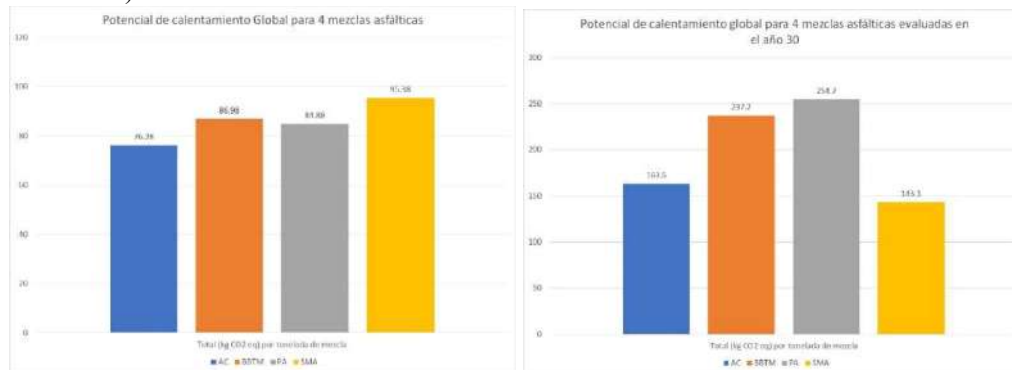
Como se observa en la tabla, las mezclas con más contenido de asfalto (SMA) y que requieren agregados de mayor calidad, tienen una mayor generación de CO₂ por tonelada de mezcla que las mezclas densas convencionales con agregados con especificaciones menos rigurosas (menor costo de transporte y distancia de acarreo) y menos contenido de asfalto. 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 los agregados y su mayor contenido de asfalto.

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, 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 5.

Tabla 5. 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	
PA	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	

Figura 5. 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).



Estas gráficas muestran de manera muy clara la importancia de la durabilidad en la sostenibilidad de los pavimentos. 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.



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 [8].

6 Conclusiones.

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.

Es una herramienta multivectorial, ya que incluye varios vectores ambientales; uso de recursos renovables y no renovables, uso de agua, emisiones al aire, al agua residuos, etc. Es mucho más amplio que la simple evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero o huella de carbono. El ACV es una evaluación cuantitativa, da valores detallados de los impactos y/o indicadores ambientales en cada fase del ciclo de vida y es objetivo, ya que el análisis se sustenta en datos fiables, sin valoración.

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 resultados obtenidos de los ACV en pavimentos marcan directrices muy claras. Es necesario promover tecnologías que:

- Reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero, sin menoscabo del desempeño de las mezclas asfálticas.
- Incrementen la durabilidad de los pavimentos asfálticos, reduciendo los mantenimientos y prolongando el tiempo entre las intervenciones.
- Reduzca la resistencia al rodamiento de los pavimentos vía la conservación de indicadores como el IRI, reduciendo el consumo de gasolina de los autos que circulan por el pavimento.
- Incorporen materiales de reúso y promueva la economía circular.

Es necesario también promover las buenas prácticas y el aseguramiento de la calidad en los procedimientos constructivos, que permitan incrementar la durabilidad de las carreteras. Establecer con los tomadores de decisiones en los proyectos públicos y privados, indicadores críticos que deban cumplirse para asegurar la calidad y la durabilidad de los pavimentos durante su construcción.



En la industria de construcción de carreteras en México tenemos un atraso en la implementación de herramientas para la evaluación de la sostenibilidad. Es necesario que todos los que formamos parte de esta industria, desde las autoridades, instituciones académicas, asociaciones gremiales, concesionarias, empresas constructoras, diseñadores de pavimentos y empresas privadas proveedores de los principales insumos participemos en fomentar una cultura de sostenibilidad.

Referencias:

- [1] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] Thacker S., Adshead D., Fantini C., Palmer R., Ghosal R., Adeoti T., Morgan G., Stratton-Short S. (2021). Infraestructura para la acción por el clima. UNOPS, Copenhague (Dinamarca).
- [3] Wang T. Lee I-S, Harvey J., Kendall, Lee E.B. and Kim C (2012) *UCPRC Life Cycle Assessment Methodology and Initial Case Studies on Energy Consumption and GHG Emissions for Pavement Preservation Treatments with different Rolling Resistance*. University of California Pavement Research Center, UC Davis, UC Berkeley
- [4] 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.
- [5] Long-Life Asphalt Pavements – Technical Version, EAPA 2007
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] *Product Category Rules (PCR) for Asphalt Mixtures, Version 2.0*, National Asphalt Pavement Association. April 2022.