

SISTEMA DE CALIFICACIÓN DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE
PAVIMENTOS RIGIDOS Y FLEXIBLES CON INCLUSIÓN DE MATERIALES
RECICLADOS



Trabajo de Grado

Presentado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Autores:

César Alberto Castro Medina
Daniel Felipe Sabogal Meléndez

Director de Tesis

Wilmar Darío Fernández Gómez

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

Octubre 30, 2020

Tabla de Contenido

1. Introducción	6
1.1. Motivación	7
1.2. Definición del Problema.....	8
1.3. Objetivos	8
1.4. Síntesis	8
1.5. Referencias	9
2. Una revisión sobre los sistemas de evaluación de sostenibilidad de pavimentos	10
2.1. Concepto de sostenibilidad en pavimentos	10
2.2. Análisis del ciclo de vida de pavimentos	11
2.3. Revisión de la literatura de los sistemas de calificación existentes para pavimentos	16
2.4. Discusión y Conclusiones	19
2.5. Referencias	20
3. Sistema de calificación de sostenibilidad ambiental de pavimentos rígidos y flexibles con inclusión de materiales reciclados	26
3.1. Introducción	27
3.1.1. Análisis del ciclo de vida	27
3.1.2. Análisis de desempeño de los pavimentos	28
3.1.3. Sistemas de calificación	29
3.2. Materiales y métodos	30
3.2.1. Unidad Funcional	30
3.2.2. Límites del sistema.....	31
3.2.3. Escenarios de estudio	31
3.3. Resultados	35
3.3.1. Desarrollo de Categorías de Sistema de Calificación de sostenibilidad.....	35
3.3.2. Ponderación de Prácticas Sostenibles.....	37
3.3.3. Prácticas sistema de Calificación	37
3.3.4. Ejemplo de aplicación	40
3.4. Discusión.....	42
3.5. Conclusiones	44
3.6. Trabajo Futuro.....	45
3.7. Referencias	46

Listado de Figuras

Figura 1. Etapas del proyecto según banco Nacional de programas y proyectos (DNP,2016).	7
Figura 2. Metodología DPSIR, mostrando la relación de las necesidades socioeconómicas y los impactos generados. Modificado de (EEA (European Environment Agency), 1999)	11
Figura 3. Relevancia de los pavimentos en los sistemas de calificación.....	18
Figura 4. profundización de los sistemas de calificación por categoría	19
Figura 5. Ciclo de vida de los pavimentos. Modificado de (Wai-Cheung Chan, 2007)	27
Figura 6. Fases de un Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) de acuerdo con Metodología ISO 14040.....	30
Figura 7. Estructuras de pavimento.....	32
Figura 8. Impactos CO ₂ eq. en las diferentes etapas del ciclo de vida para las estructuras de pavimento estudiada y T4	35
Figura 9. Comparación de Emisiones para diferentes volúmenes de Transito y Plataformas de Soporte	36
Figura 10. Impactos por distancias de acarreo	38
Figura 11. Emisiones por IRI	39
Figura 12. Secuencia de Aplicación sistema de Calificación.....	41
Figura 13. Comparación de Alternativas Evaluadas Con el Sistema de Calificación.....	42

Listado de Tablas

Tabla 1. LCA mezclas densas en caliente realizados.....	12
Tabla 2. Síntesis de LCA en Pavimento Rígido	13
Tabla 3. Diferencia de emisiones de CO ₂ por inclusión de RAP. Modificado de (Epa, 2013).....	14
Tabla 4. Síntesis de LCA en Pavimentos reciclados (RAP).....	14
Tabla 5. Síntesis de LCA en pavimentos con Agregado de concreto reciclado (ACR)	15
Tabla 6. Síntesis de LCA en pavimentos con inclusión de grano de caucho.....	16
Tabla 7. Sistemas de calificación de sostenibilidad aplicados a pavimentos.	17
Tabla 8. Variables entrada diseño de pavimentos (Reyes 2018).....	31
Tabla 9 Resumen maquinaria usada.....	32
Tabla 10. Materiales necesarios para la conformación de las estructuras de pavimento diseñadas..	33
Tabla 11. Impactos estructuras de pavimento, subrasante 35 MPa, T4.....	34
Tabla 12. Impactos estructuras de pavimento, subrasante 180 MPa, T4	34
Tabla 13. Distribución porcentual de impactos en las etapas del ciclo de vida para tránsito T4.	36
Tabla 14. Listado de Buenas prácticas categoría Materiales.....	37
Tabla 15. Listado de Buenas prácticas categoría Construcción	38
Tabla 16. Reducción material particulado (kg MP2.5 eq) para una MDC por uso de tecnologías Euro IV y Euro V	39
Tabla 17. Buenas prácticas categoría operación	40
Tabla 18. Buenas prácticas categoría mantenimiento	40
Tabla 19. Alternativas hipotéticas para aplicación de Sistema de Calificación	41

Capítulo 1

1. Introducción

La infraestructura es esencial para el crecimiento y el desarrollo socioeconómico de cualquier país. Buenas vías, sistemas de acueducto, electricidad en todas las viviendas y saneamiento básico no solo hacen posible la producción industrial o la provisión de servicios básicos para los ciudadanos, sino también son un motor para el desarrollo: aumentan la productividad, reducen los costos de vida, facilitan la acumulación de capital humano ya que permiten un mayor acceso a la educación o a la sanidad, ayudan a diversificar la estructura productiva y crean puestos de trabajo (Bonifaz et al., 2020). Ahora, la infraestructura de transporte puede ser tratada desde múltiples perspectivas y para un amplio número de subsectores derivados. Por ejemplo, puede ser estudiada desde el punto de vista del estado físico o económico de las vías, o desde el punto de vista del tipo de transporte (carretero, fluvial, aéreo, portuario), o también haciendo la distinción entre el transporte rural y el urbano.

En el caso del transporte terrestre como una de las formas de infraestructura productiva, Colombia presenta uno de los menores indicadores en términos del número de kilómetros de vías pavimentadas por trabajador (menos de 1 km), superado levemente por países como Perú y Guatemala (1.1 km), por Chile y Brasil (con cerca de 2.5 km), por Venezuela (con 3.6 km) y superado también por Malasia y Argentina (con 5.2 km y 5.9 km, respectivamente) datos del foro económico mundial (WEF, 2020). De modo que, dentro de la infraestructura productiva, la del transporte en términos del número de kilómetros de vías pavimentadas es la más rezagada (Flintsch, 2019). Por otra parte, el concepto de desarrollo sostenible de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil (ASCE), describe que un desarrollo sostenible es el desafío de satisfacer las necesidades humanas de recursos naturales, productos industriales, energía, alimentos, transporte, refugio y gestión eficaz de residuos, al tiempo que se conserva y protege la calidad del medio ambiente que es la base de los recursos naturales esenciales para el desarrollo futuro (ASCE, 2018),(Brodie et al., 2013). El desarrollo sostenible implica la adaptación y el fomento de prácticas sostenibles en el ámbito de la infraestructura. Por mencionar, el impacto de las carreteras sobre el medio ambiente es enorme como resultado de sus actividades de ciclo de vida ya que involucran planificación, diseño, extracción de materiales, construcción, uso, mantenimiento y demolición (Epa, 2013)

En efecto, la industria de la construcción ha sido responsable también del alto consumo de energía, la generación de residuos sólidos, la generación de gases efecto invernadero (GHG), la contaminación, los daños ambientales, y el agotamiento de los recursos naturales. Debido al gran procesamiento inicial de materias primas en la construcción de pavimentos, la cantidad de energía primaria requerida y las emisiones de CO₂ asociadas son relativamente más altas en comparación con la construcción de edificaciones. (Molina-Solana et al., 2017). Por lo anterior es necesaria la implementación de la medición de sostenibilidad en los nuevos procesos constructivos. En Colombia la toma de decisiones para la ejecución de proyectos de inversión pública se encuentra regulado por el Banco Nacional de programas y proyectos, quien mediante la formulación del ciclo de los proyectos establece la conveniencia o inconveniencia de la realización de dichos proyectos incluidos los de infraestructura vial.

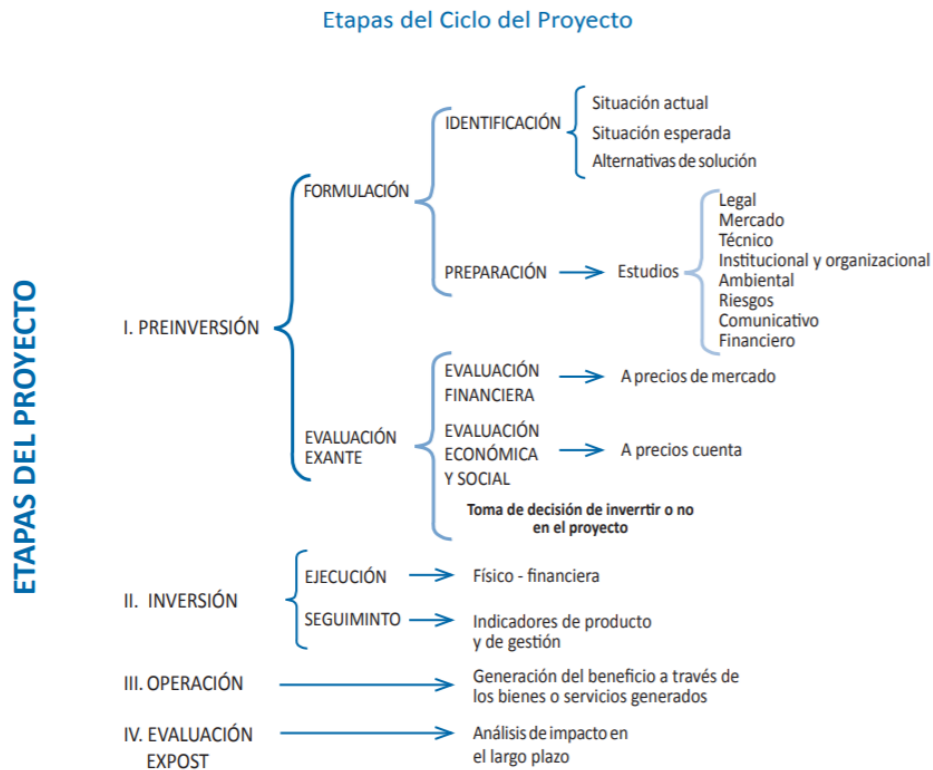


Figura 1. Etapas del proyecto según banco Nacional de programas y proyectos (DNP,2016).

Dentro de la formulación del proyecto se tienen en cuenta la totalidad de sus fuentes de financiación, así como los estudios técnicos, legales, ambientales y económicos que garantizarán una buena ejecución de los proyectos desarrollados (Figura 1). Sin embargo, al momento de realizar la evaluación exante solo se tiene en cuenta tres tipos de evaluación: La evaluación financiera, del interés del inversionista privado, del gobierno y de las instituciones financieras; La evaluación económica y la evaluación social: que mide el aporte neto del proyecto al bienestar nacional. Este tipo de estudios hace visible que en Colombia no se realiza una evaluación de Sostenibilidad previa al desarrollo de los proyectos de infraestructura.

De otro lado, la evaluación de sostenibilidad ha tomado fuerza los últimos años, pero su implementación en el país ha sido lenta, como lo han sido también por décadas la implantación y posicionamiento de nuevas tecnologías. Dentro del Foro de Evolución digital(2017) se señaló que la Industria de la construcción en Colombia es una de las más tradicionales en el mundo y en muchas ocasiones asociada a lo obsoleto ya que por 50 años se ha construido de la misma manera (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia –ANDI, 2017). Aquí se encuentra una brecha importante de estudio, desde una mirada de construcción verde o construcción sostenible.

1.1.Motivación

Las vías son esenciales para el crecimiento y el desarrollo socioeconómico de cualquier nación, aumentan la productividad, reducen los costos de vida, facilitan la acumulación de capital humano, ayudan a diversificar la estructura productiva y crean puestos de trabajo (Bonifaz et al., 2020). Sin embargo, se estima que los pavimentos son altos generadores de impactos ambientales, lo que motiva la búsqueda de estrategias y/o respuestas que permitan reducir emisiones en su vida útil. Dado el crecimiento en infraestructura vial carretera en Colombia y la constante construcción de pavimentos en los últimos años, se hace importante crear metodologías que permitan evaluar la sostenibilidad ambiental de los proyectos en todo su ciclo de vida, dentro de los que se encuentran los sistemas de calificación de sostenibilidad ambiental de la infraestructura vial.

1.2. Definición del Problema

En la actualidad existen diferentes sistemas de calificación de sostenibilidad de infraestructura vial carretera, los cuales son implementados en países con alto nivel de industrialización. Estos se encuentran adaptados al contexto tecnológico del entorno en donde fueron desarrollados, lo que implica limitaciones de su aplicación en otros países, especialmente en aquellos en vía de desarrollo. Por lo tanto, se hace necesaria la creación de un Sistema de calificación de sostenibilidad ambiental basado en los impactos del ciclo de vida, ajustado a la realidad nacional, en donde se involucren prácticas a la medida de los recursos locales y se ajusten a las políticas públicas vigentes. Por lo cual se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera el análisis del ciclo de vida de los pavimentos permite la formulación de prácticas ambientalmente sostenibles?

1.3. Objetivos

Para dar respuesta a la pregunta de investigación se plantea proponer un sistema de calificación de sostenibilidad ambiental, basado en los impactos del ciclo de vida aplicado a Pavimentos flexibles convencionales, con inclusión de RCD y RAP en las capas de materiales granulares no ligados, GCR en las bases asfálticas y Pavimento rígido convencional en alturas superiores o iguales a 2000 m.s.n.m. a través de los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los impactos producidos por combustibles fósiles (MJ), gases efecto invernadero (kg CO₂ eq), material particulado (kg MP2.5) y smog (kg O₃ eq) en cada una de las etapas del ciclo de vida para las estructuras de pavimento objeto de estudio.
- Formular un listado de prácticas ambientalmente sostenibles, basado en las actividades, materiales y condiciones superficiales en el ciclo de vida de los pavimentos objeto de estudio
- Explicar el sistema de calificación de sostenibilidad ambiental desarrollado mediante su aplicación en un estudio de caso hipotético.

1.4. Síntesis

El presente trabajo está dividido en tres capítulos, una introducción donde se presenta la motivación y la aproximación para desarrollar el problema de investigación. En el segundo capítulo se hace una revisión de la literatura relevante sobre el tema y en el tercer capítulo que corresponde al capítulo principal, se presentan los resultados de los diferentes análisis del ciclo de vida y la propuesta y evaluación del sistema de calificación de sostenibilidad de pavimentos para las condiciones colombianas.

1.5. Referencias

- ASCE. (2018). *ASCE Five-Year Roadmap to Sustainable Development*. 1–5. https://www.asce.org/uploadedFiles/Issues_and_Advocacy/Sustainability/Content_Pieces/ASCE-Sustainability-Five-Year-Roadmap.pdf
- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia –ANDI. (2017). *Estrategia Para Una Nueva Industrialización II*. 148–185. www.unatintamedios.com
- Bonifaz, J. L., Urrunaga, R., Aguirre, J., & Quequezana, P. (2020). Brecha de infraestructura en el Perú: Estimación de la brecha de infraestructura de largo plazo 2019-2038. *Brecha de Infraestructura En El Perú: Estimación de La Brecha de Infraestructura de Largo Plazo 2019-2038*. <https://doi.org/10.18235/0002641>
- Brodie, S., Ingles, A., Colville, Z., Amekudzi, A., Peters, R. W., & Sisiopikou, V. (2013). Review of Sustainability Rating Systems for Transportation and Neighborhood-Level Developments. In *Green Streets, Highways, and Development 2013* (pp. 337–354). <https://doi.org/10.1061/9780784413197.027>
- DNP. (2016). Departamento Nacional de Planeación. Documento CONPES 3582, 69. <https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3582.pdf>
- Epa, U. S. (2013). *Analysis of Recycling of Asphalt Shingles in Pavement Mixes from a Life Cycle Perspective*.
- Flintsch, G. W. (2019). *Estado de la gestión de activos viales en América Latina y el Caribe* (A. Pereyra, J. Alberti, & L. Uechi (eds.)). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0001785>

Capítulo 2

2. Una revisión sobre los sistemas de evaluación de sostenibilidad de pavimentos

Cesar A. Castro M, Daniel F. Sabogal M.

Maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia

Resumen

La sostenibilidad se ha convertido en un criterio fundamental para la evaluación y construcción de proyectos de infraestructura vial. Diferentes metodologías se han establecido para medir las emisiones ambientales de los pavimentos, las más relevantes son el análisis del ciclo de vida (LCA) que mide los impactos generados en cada una de las etapas del ciclo de vida y que ha sido aplicada principalmente para estudiar como la inclusión de materiales reciclados genera una reducción de las emisiones ambientales y los sistemas de calificación que son una herramienta que permite tomar decisiones a partir de una calificación ambiental de un proyecto a través de la puntuación obtenida por la aplicación de buenas prácticas ambientales que generan la reducción de impactos. Este estudio hace una revisión bibliográfica de cada una de las metodologías descritas en los últimos años y evalúa sus fortalezas y debilidades para su aplicación en el contexto colombiano.

Palabras clave: Sostenibilidad, Pavimentos Sostenibles, Evaluación de Impactos del Ciclo de vida, sistemas de calificación de sostenibilidad.

Abstract

In recent years sustainability has become one of the main criteria for the assessment and construction of road infrastructure projects. Different methodologies have been established to measure the environmental impacts of pavements, one of the most relevant is the life cycle assessment (LCA), this methodology measure the impacts generated by each one of the stages of the life cycle and has been applied mainly to study how the recycled materials reduce environmental emissions. The rating system is a tool that make possible to take decisions trough an environmental rating of a project obtained by applying the best practices int terms of sustainability that could generate impact reductions. This study makes a bibliographic review of each one of the methodologies described in the last years and evaluates the strengths and weaknesses of these for its application in the Colombian context.

Keywords: Sustainability, Sustainable Pavements, Life Cicle Impact Assesment, Sustaibable Rating System.

2.1. Concepto de sostenibilidad en pavimentos

El concepto de sostenibilidad fue definido inicialmente por las Naciones Unidas como el desarrollo que satisface las necesidades presentes sin afectar la viabilidad ambiental de las generaciones futuras (Brundtland, 1987). En los últimos 20 años se ha adoptado la construcción sostenible o construcción verde (Seyfang, 2010) (Bon & Hutchinson, 2000), con el objetivo de implementar prácticas ambientalmente sostenibles para reducir los impactos generados al medio ambiente a lo largo del

ciclo de vida, desde la etapa de diseño, pasando por el proceso constructivo y finalizando con la etapa de uso u operación.

Para medir la sostenibilidad de los pavimentos se han desarrollado herramientas basadas en el marco de referencia DPSIR, (factor determinante, presión, estado, impacto, respuesta) (EEA (European Environment Agency), 1999). Bajo esta mirada esquematizada en la Figura 2, las necesidades económicas y sociales se ven representadas como presiones al ambiente que generan impactos y es necesario dar respuestas efectivas para evitar afectaciones futuras o reducir los impactos. En el caso de los pavimentos la construcción de las estructuras afectan el estado de los ecosistemas (ambiente) lo que genera unos impactos como fragmentación y emisiones por los procesos de construcción y uso de la vía (presión) y a los que es necesario dar una respuesta para evitar futuras afectaciones como por ejemplo desarrollando herramientas de medición de sostenibilidad ambiental que permitan formular acciones para reducir o mitigar los impactos (Smeets & Others, 1999).

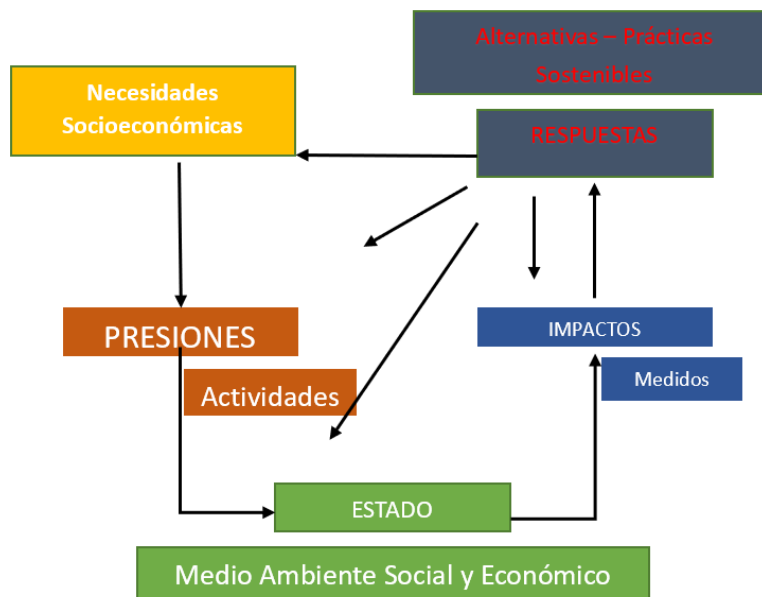


Figura 2. Metodología DPSIR, mostrando la relación de las necesidades socioeconómicas y los impactos generados. Modificado de (EEA (European Environment Agency), 1999)

Bajo el anterior concepto las metodologías para medir la sostenibilidad ambiental de los pavimentos son respuestas a las necesidades socio económicas de la construcción de vías. Por tanto, el objetivo de este artículo es realizar una revisión bibliográfica de los sistemas de evaluación de sostenibilidad ambiental aplicados a pavimentos y así identificar las diferentes actividades que han permitido reducir los impactos generados al medio ambiente.

2.2. Análisis del ciclo de vida de pavimentos

De acuerdo ISO 14044 el análisis del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) es una metodología que permite medir la sostenibilidad ambiental a través de la cuantificación de los impactos ambientales generados desde la explotación de los materiales, hasta el final de la vida útil de un servicio o un producto (Jahanshahloo et al., 2006), (J. Li et al., 2019a), (Santero et al., 2011). En general en la literatura reportada, se presentan tres metodologías para realizar el análisis de los impactos ambientales en el ciclo de vida, la primera son los impactos del ciclo de vida (LCI por sus siglas en inglés), que corresponde a la cuantificación de los inventarios de los impactos a lo largo

del ciclo de vida generados por las entradas de un producto delimitado a un sector (H. C. Li, 2019) y que es la más usada, la segunda es el de entrada-salida (IO por sus sigla en inglés), la cual incluye toda la cadena de producción y sectores económicos de un proceso o producto dado (J. Li et al., 2019a) (Islam et al., 2016). La tercera es el LCI híbrido (Suh & Huppel, 2005), que utiliza la metodología del LCI y del LCI (IO) para medir los impactos.

El ciclo de vida de los pavimentos por lo general se divide en 5 etapas: 1) Materiales, 2) Construcción, 3) Operación, 4) Mantenimiento y 5) Final de la vida útil (Santero et al., 2011) (Harvey et al., 2010) (Thiel et al., 2014). Otros autores como (Huang et al., 2009) incluyen la etapa de diseño al considerarla un factor importante para cuantificar los impactos dado que esta etapa especifica los materiales y métodos constructivos y otros eliminan la etapa de operación (Inyim et al., 2016) ya que la consideran como parte del ciclo de vida de los vehículos y no de los pavimentos (Stripple & Uppenber, 2010). Cada fase comprende diferentes actividades que permiten calcular los impactos de cada una de ellas con el fin de obtener todas las emisiones generadas a lo largo de la vida útil de las estructuras de pavimento.

Mezclas densas en caliente.

Häkkinen & Mäkelä (1996) reportaron una de las primeras evaluaciones del ciclo de vida de mezclas densas en caliente, evaluaron las emisiones de CO₂, el consumo energético, la polución y los metales pesados generados desde la etapa de adquisición de materiales hasta la etapa de operación, en este estudio los autores no tuvieron en cuenta la etapa de mantenimiento. En la [Tabla 1](#) se presentan diferentes estudios de análisis del ciclo de vida realizados para las mezclas densas en caliente.

En ese sentido se destaca que (Mazumder et al, (2016) presentan un estudio con un periodo de análisis de 50 años para un tránsito de 20.000 vehículos/día para las etapas de extracción de material, producción, construcción, transporte, uso, disposición final y reúso de material para mezclas densas en caliente y mezclas tibias, concluyendo que la etapa de operación genera mayores aportes al calentamiento global y a pesar de la dificultad de reducir emisiones en la etapa de operación, la utilización de nuevos materiales como las mezclas tibias pueden tener la capacidad de reducir hasta un 26% los impactos de todo el ciclo de vida. Por otra parte, Landi et al, (2020) compara una mezcla densa en caliente con otros materiales encontrando reducciones hasta de un 25%. Sin embargo, las conclusiones y resultados obtenidos son basadas en la unidad funcional determinada en su estudio (m²), lo que hace que la comparación entre diferentes estudios en algunas ocasiones no pueda hacerse de forma directa.

Tabla 1. LCA mezclas densas en caliente realizados

Estudio	Unidad funcional	Ancho carril (m)	Numero carriles	Periodo analizado	CO ₂ (kg/km)
Häkkinen and Mäkelä (1996)	1 Km	-	-	50	640000
Berthiaume and Bouchard (1999)	1 Km	-	-	50	-
(Park et al., 2007)	1 Km	-	-	20	621000
(Cheung Chan, 2007)	1 Km	-	-	25	440000
(Liu et al., 2014)	1 Km	3.6	2	40	-
(Aurangzeb et al., 2014)	1 Km	-	-	45	378248
(Celauro et al., 2015)	1 Km	3.5	2	30	733000
(Vidal et al., 2013)	1 Km	-	2	40	448000
(Araújo et al., 2014a)	1Km	3.5	2	20	11814173

(Mazumder et al., 2016)	1Km	3.75	2	50	102717729
(Landi et al., 2020)	1m2	15	1	30	

Pavimento rígido

Uno de los primeros estudios de impactos ambientales de pavimentos rígidos lo realizaron Roudebush (1999) y Häkkinen & Mäkelä, (1996) quienes compararon una estructura de pavimento con una mezcla densa en caliente (MDC) y una estructura conformada en pavimento rígido mediante el LCA, obteniendo como resultado que el concreto requiere un 90.8% más de consumo energético en comparación con la estructura de pavimento con una mezcla densa en caliente. (W. Zhang et al., 2008a). Smith (2016) realizó inclusión de cenizas.(Smith & Durham, 2016b). Singh et al (2020) realizado un estudio para comparar los impactos de pavimentos permeables en comparación con los tradicionales encontrando reducciones de entre un 2.7 % y un 3% de emisiones ambientales (Singh et al., 2020).

Tabla 2. Síntesis de LCA en Pavimento Rígido

Estudio	Unidad funcional	Ancho carril (m)	Numero carriles	Periodo analizado(años)	CO ₂ (kg/km)
Häkkinen and Mäkelä (1996)	1 km	-	-	50	896000-1.024.000
(Roudebush, 2003)	1Km	3.60	2	10	
(Loijos, 2010)	1m ²			50	25000
(W.Mack et al., 2012)	1Milla			50	3954000
(Gregory et al., 2016)	1Km	3.6	6	50	16500000
(Santero et al., 2011)	1Km	3.6	2	30	6700000
(Santos et al., 2013)	1Km	3.75	6	50	9000000
(Xu et al., 2014)	1Km		6	50	15000000
(Smith & Durham, 2016a)	18.43 Km	3.65	4	50	3750000
(Shi et al., 2018a)	4.8 Km	3.75	2	20	4000000
(Nascimento et al., 2020)	1 m2			20	6070
(MACK et al., 2009)	1.6 km			50	7200000
(Singh et al., 2020)	1.0 0 km	3.5	2	-	10648000
(Heidari et al., 2020)	1.0 0 km	3.6	6	-	1.820.316.861
(AzariJafari et al., 2020)	1m2			20	6070

Pavimentos reciclados (RAP)

Los principales estudios realizados del ciclo de vida para pavimentos reciclados fueron realizados por Miliutenko et al (2013). Sin embargo, el autor no encontró una reducción de emisiones al compararlo con una mezcla densa en caliente tradicional. Por su parte la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) (Epa, 2013) realizó una comparación de los gases efecto invernadero generados por pavimentos con inclusión de RAP en diferentes proporciones a una mezcla densa en caliente. Estos resultados presentados en la [Tabla 3](#) muestran que la inclusión de un 17% de RAP en la mezcla asfáltica genera una mayor reducción de emisiones de CO₂ en comparación con una inclusión de un 20% de RAP.

Tabla 3. Diferencia de emisiones de CO₂ por inclusión de RAP. Modificado de (Epa, 2013)

Mezcla asfáltica	Contenido de Rap (%)	Emisiones CO₂ (libras/ton)
HMA 1	0	164.5
HMA 2	20	155.4
HMA 3	20	130.5
HMA 4	20	124.1
HMA 5	20	117.5
HMA 6	17	132.6
HMA 7	0	150.3

Jullien et al, (2006) realizaron estudios del LCA para mezclas con la inclusión de un 30% de RAP en mezclas asfálticas y encontraron reducciones de hasta un 30% de emisiones gases efecto invernadero (Jullien et al., 2006). Aurangzeb et al, (2014) evaluaron los impactos ambientales al inclusión de un 30% - 40% y 50% de RAP en mezclas asfálticas encontrando reducciones de hasta un 25% de emisiones gases efecto invernadero (Araújo et al., 2014a) (Aurangzeb et al., 2014).

Tabla 4. Síntesis de LCA en Pavimentos reciclados (RAP)

Estudio	Unidad funcional	Ancho carril (m)	Numero carriles	Material	Periodo analizado(años)	CO₂
(Booz et al., 2013)	1 ton	-	-	HMA (20% RAP)	-	74 (kg/ton)
(Giani et al., 2015)	1 km	3.5	4	HMA (10% RAP Base Asfáltica)	30	738000(kg/km)
(Giani et al., 2015)	1 km	3.5	4	HMA (20% RAP SUBBASE)	30	688000(kg/km)
(Santos et al., 2019)	1 km	3.5	4	HMA (50% RAP)	30	1202558(kg/kn)
(Santos et al., 2019)	1 km	3.5	4	WMA (50% RAP)	30	1182016(kg/km)
(Shi et al., 2018b)	4.8 km	3.75	4	PCC (40% RAP)	30	10300000(kg/km)
(Gulotta et al., 2019)	1 m ²	-	-	HMA (30% RAP)	-	8.82(kg/m ²)
(Cao et al., 2019)	1 km	3.5	4	HMA (30% RAP)	30	47.91 E3(kg/km)
(Blaauw & Maina, 2021)	1 Ton	-	-	HMA (22% RAP)	-	50.82(kg/ton)

Agregado de concreto reciclado (ACR)

En el 2000, Mroueh se enfocó en estudiar como la inclusión de productos industriales y aditivos en las estructuras de pavimento generaban mayores emisiones al medio ambiente y analizó principalmente en la etapa de explotación y producción de materiales. A partir del 2006 el Athena Institute compara la energía y las emisiones de gases efecto invernadero producidos por seis casos de estudios en Canadá. Chowdhury et al. (2010) concluyeron que la inclusión de concreto reciclado como agregado para la mezcla asfáltica genera mayores impactos si se compara con el uso de agregados naturales.(Chowdhury et al., 2010) y que esto podía estar relacionado con las distancias de acarreo del material (Marinković et al., 2013). Por su lado, Mroueh et al. (2000) años antes habían encontrado una reducción de emisiones ambientales con la inclusión de concreto reciclado como agregado para la composición de la mezcla asfáltica.(U.-M. Mroueh et al., 2001)(AzariJafari et al., 2016a). En la [Tabla 5](#) se presentan los diferentes estudios realizados con pavimentos con inclusiones de ACR para diferentes unidades funcionales y los impactos obtenidos en cada uno de dichos estudios.

Tabla 5. Síntesis de LCA en pavimentos con Agregado de concreto reciclado (ACR)

Estudio	Unidad funcional	Ancho carril (m)	Numero carriles	Material	Periodo analizado(años)	CO ₂
(Ding et al., 2016)	1 m ³	.	-	WMA (50% RCA)	10	405.86 (kg/m ³)
(Ding et al., 2016)	1 m ³	-	-	WMA (100% RCA)	10	428.93(kg/ m ³)
(Kurda et al., 2018)	1 m ³			P.R (50% RCA)	-	3610(kg/ m ³)
(Kurda et al., 2018)	1 m ³			P.R (100% RCA)	-	3600(kg/ m ³)
(Vega et al., 2019)	1ton	-	-	WMA (15% RCA)	10	2680000(kg/t)
(Vega et al., 2019)	1ton	-	-	WMA (30% RCA)	10	2530000(kg/t)
(Vega et al., 2019)	1ton	-	-	WMA (45% RCA)	-	2890000(kg/t)
(Bahi et al., 2020)	3.5 km	3.65	4	HMA (60% RCA)	30	2427640(kg/km)
(Vega-Araujo et al., 2020)	1km	3.5	1	WMA (15% RCA)	10	3380000(kg/km)
(Vega-Araujo et al., 2020)	1km	3.5	1	WMA (30% RCA)	10	3650000(kg/km)
(Vega-Araujo et al., 2020)	1km	3.5	1	WMA (45% RCA)	10	367000(kg/km)

Caucho molido proveniente de llantas.

Stout et al. (2003) compararon estudios de emisiones entre mezclas asfálticas no modificadas y otras con adición de grano de caucho obteniendo como resultado que las emisiones derivadas del proceso de manufactura no presentan diferencias significativas en cuanto a emisiones de CO₂. En 2008 Chiu et al., (2008) compararon estructuras de pavimento que contenían asfalto reciclado (RAP), caucho y vidrio molido en mezclas densas en caliente tradicionales. Los impactos se midieron con el software Eco-indicator 99 ®. Los resultados mostraban que las mezclas modificadas con RAP y caucho molido presentaron menores impactos en comparación con las estructuras de mezclas densas en caliente y que la mezcla a la cual se le adiciono el vidrio molido presentaba un aumento en cuanto a consumos energéticos y a impactos generados. Los resultados mostraron que la inclusión de caucho molido a

mezclas asfálticas genera una reducción de 23% en los impactos ambientales.(Farina et al., 2017) las altas temperaturas requeridas para su construcción resultan en altos consumos energéticos, otros autores como Heidari et al, (2020) proponen mezclas tibias como forma de reducir el consumo energético mejorando la eficiencia del grano de caucho reciclado y su uso en pavimentos. En la Tabla 6 se pueden observar los diferentes estudios realizados con inclusión de caucho molido.

A pesar de que en Colombia es escasa la evidencia sobre la estimación de las cargas ambientales de los materiales usados para la construcción y el mantenimiento de las estructuras de pavimento. (Martínez-Argüelles et al., 2013) presenta un análisis de impactos ambientales para diferentes casos de mantenimiento utilizando como herramienta de cálculo Eco-indicator99 en la ciudad de Bogotá.

Tabla 6. Síntesis de LCA en pavimentos con inclusión de grano de caucho

Estudio	Unidad funcional	Ancho carril (m)	Numero carriles	Material	Periodo analizado (Años)	CO ₂ (kg/km)
(Stout et al., 2003)	--	--	--	--	--	--
(Bartolozzi et al., 2012)	1 Km	3.5	2	Crumb Rubber HMA + 18% Crumb Rubber HMA + 18% Rap (aggregate)	1	31676
(Farina et al., 2017)	1 m	9.5	1	Crumb Rubber HMA + 18% Rap (aggregate)	18/20	--
(Cao et al., 2019)	1 Km/lane	--	1		20	--
(Landi et al., 2020)	1m2	15	1	MDC	30	--
(Cao et al., 2019)	1 m2	15	1	End of life tires - Fiber Reinforced	30	--

2.3. Revisión de la literatura de los sistemas de calificación existentes para pavimentos

Los sistemas de calificación son una herramienta importante para poder medir la sostenibilidad de las estructuras de pavimento (Mattinzioli et al., 2020), estos , son en esencia un listado de buenas prácticas que deben cumplir con dos principios fundamentales: (1) ir más allá de los de los mínimos regulatorios requeridos o prácticas comúnmente realizadas y (2) mostrar innovación en de estos mínimos regulatorios requeridos (Dam, Harvey, Muench, D., Snyder, et al., 2011)).Las buenas prácticas se refieren a la inclusión de actividades en las diferentes etapas del ciclo de vida que permiten generar reducción en los impactos ambientales y que pueden ser aplicadas a un proyecto con el fin evaluar el rendimiento en cuanto a sostenibilidad del mismo.(Y. Zhang & Mohsen, 2018).

En el caso de la infraestructura vial a partir del año 2004 algunos grupos de investigación en el área de ingeniería de diferentes universidades y departamentos administrativos de vías y carreteras del mundo tales como la Federal Highway Administration, La Universidad de Washington, el Instituto de Infraestructura Sostenible de Washington y el Programa Zofnass de Infraestructura Sostenible de la Universidad Harvard y la Federación de Carreteras de la Unión Europea,(Melizza et al., 2015) han enfocado sus estudios hacia desarrollar sistemas que permitan medir el grado de sostenibilidad aplicado a nuevos proyectos de construcción de infraestructura vial y han dado como resultados los principales Sistemas de calificación a saber Invest, Envision, GreenRoads, Stars y I-Last (Clevenger et al., 2013).

En 2020 se reportan una importante cantidad de Sistemas de calificación de sostenibilidad de infraestructura vial carreteras dentro de los cuales se destacan Greenroads, (Muench et al., 2010), Green LITES (Green Leadership In Transportation Environmental Sustainability), (Thompson et al., 2013), INVEST (Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool), (Clevenger et al., 2013), I-LAST (Livable And Sustainable Transportation), (Knuth & Fortmann, 2010) y STARS (Sustainable Transportation Analysis and Rating System) (Sarsam, 2015).

Con el fin de complementar la revisión bibliográfica en la [Tabla 7](#) se presentan los sistemas de calificación reportados a la fecha, que se aplican al estudio de pavimentos, con sus objetivos y criterios de evaluación correspondientes.

Tabla 7. Sistemas de calificación de sostenibilidad aplicados a pavimentos.

Nombre	Año de desarrollo	Autor	Objetivo	Categorías (Criterios)
CEEQUAL	2003.	Instituto de Ingenieros Civiles y el Gobierno del Reino Unido.(Diaz-Sarachaga et al., 2016a)	Evaluar el desempeño ambiental y la sostenibilidad en proyectos de ingeniería civil y de paisajismo durante las etapas de diseño, construcción y mantenimiento.	Estrategia del Proyecto. Gestión de Proyectos. Población y comunidades. Uso del Suelo y Paisaje. Medio Ambiente. Ecología y Biodiversidad. Medio Acuático. Recursos Físicos. Transporte (Kerry A. Griffiths, 2017)
GreenLITES	2008	Departamento de transito de Nueva York. (Bryce et al., 2017)	Promover el transporte y carretas sostenibles como una alternativa para reducir los impactos negativos	Sitios Sostenibles. Calidad del Agua. Materiales y Recursos. Energía y Medio Ambiente. Innovación. (Clevenger et al., 2013)
Green roads	2010	Universidad de Washington (UW) y CH2M Hill (Dam, Harvey, Muench, D., Snyder, et al., 2011)	Reconocer la aplicación de buenas prácticas sostenibles en el diseño y construcción de carreteras.	Requerimientos del Proyecto de Carreteras. Medio Ambiente y Agua. Acceso y Equidad. Actividades de Construcción. Materiales y Recursos. Tecnología de Pavimentos. (Sarsam, 2015)
Best-in-Highways	2011	Centro de recursos de materiales reciclados.- Universidad de Wisconsin/Madison(Lee et al., 2013)	Cuantificar el impacto del uso de materiales reciclados en construcción	Consumo energético Materia reciclado in Situ/Material total reciclado Consumo de agua Ruidos por trafico Costo social del carbono. (Lee et al., 2013)
STARS	2011	Departamento de transito de Oregón.(W. Zhang et al., 2008a)	Medir la sostenibilidad ambiental de os sistemas de transporte.	Acceso y movilidad. Seguridad y salud. Equidad Economía (North American Sustainable Transportation Council, 2012)
Infraestructure Sustainability	2012	Consejo Australiano de Infraestructura Verde- AGIC	Evaluar la sostenibilidad en el diseño, construcción y operación de la infraestructura de transporte.	Gestión y Gobernabilidad. Uso de los Recursos. Emisiones, Contaminación y Residuos. Ecología. Comunidad. Innovación (Diaz-Sarachaga et al., 2016b)
INVEST	2012	Administración Federal de Carreteras (FHWA) de Estados Unidos.(Reid et al., 2010)	Proporcionar orientación a los profesionales para evaluar la sostenibilidad de sus proyectos y programas de transporte	Planificación del sistema. Desarrollo del Proyecto. Operaciones y Mantenimiento. (Clevenger et al., 2013)

Nombre	Año de desarrollo	Autor	Objetivo	Categorías (Criterios)
Envision	2012	Instituto de Infraestructura Sostenible de Washington y el Programa Zofnass de Infraestructura Sostenible de la Universidad Harvard. (Bryce et al., 2017)	Calificar y evaluar los aspectos sociales, ambientales y económicos, a través del análisis del ciclo de vida de cualquier tipo y tamaño de proyecto de infraestructura civil.	Calidad de vida. Liderazgo. Asignación de recursos. Mundo natural. Clima y riesgo. Planificación y Diseño de la Carretera. Construcción, Operación y Mantenimiento de la Carretera.(Maher et al., 2015)
Green Pave	2014	Instituto de Infraestructura de Ontario Canadá	Mejorar la sostenibilidad de la infraestructura de transporte a través del diseño y selección de alternativas sostenibles.	Tecnología en pavimentos. Materiales y recursos. Energía y Atmósfera Innovación y proceso de diseño(Y. Zhang & Mohsen, 2018).

Teniendo en cuenta que los diferentes sistemas de calificación presentados en la [Tabla 7](#), fueron concebidos para evaluar proyectos de infraestructura vial y no exclusivamente las estructuras de pavimento, se hizo necesario evaluar la relevancia de los pavimentos sobre el peso total de la calificación otorgada, en la [Figura 3](#) se puede observar el porcentaje de la calificación que es otorgada a las estructuras de pavimento por cada uno de estos sistemas.

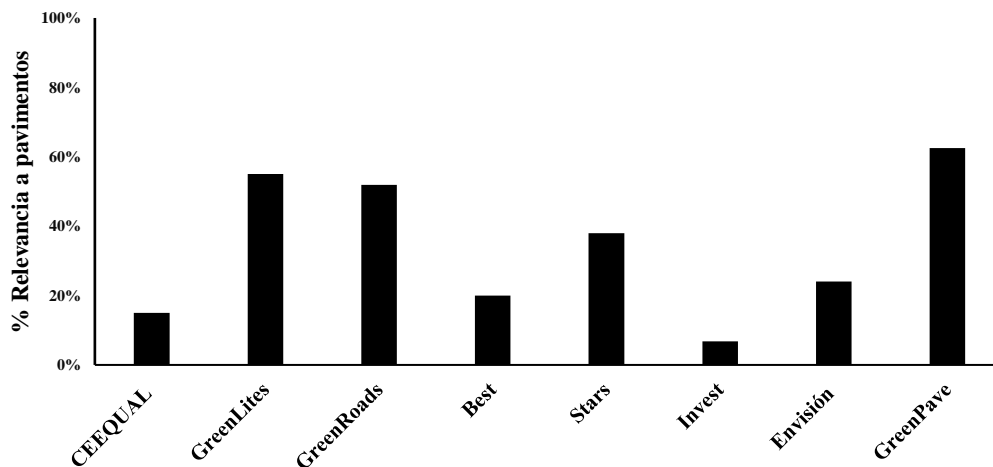


Figura 3. Relevancia de los pavimentos en los sistemas de calificación.

Dado que cada uno de los sistemas fue desarrollado por una entidad independiente, los métodos de evaluación son disimiles, la rigurosidad de estudio depende de cada sistema en particular y el peso de cada una de las categorías evaluadas varía en cada uno de los sistemas de calificación. En la [Figura 4](#) se presenta una evaluación de las fortalezas y debilidades de cada uno de los principales modelos de calificación aplicados a los proyectos de infraestructura vial carretera donde 100 representa la profundización de los sistemas de calificación para cada una de las categorías evaluadas.

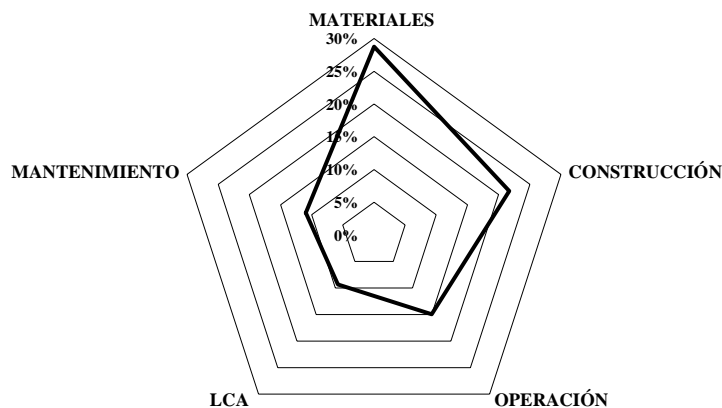


Figura 4. profundización de los sistemas de calificación por categoría

Es posible observar que las principales categorías de profundización de los sistemas de calificación estudiados están relacionadas en un mayor porcentaje con la inclusión de materiales reciclados para la conformación de las estructuras de pavimento, así como las actividades de construcción. Sin embargo, en muchos de los sistemas de calificación no hay una relevancia marcada en la realización del análisis del ciclo de vida para saber cómo la implementación de nuevas prácticas o actividades puede llegar a reducir los impactos ambientales. Por tanto, se hace necesario la inclusión de esta metodología en los sistemas de calificación para que a partir de los resultados obtenidos de las emisiones ambientales se pueda conocer cuantitativamente las reducciones de impactos generados por la implementación de nuevas prácticas ambientalmente sostenibles.

2.4. Discusión y Conclusiones

Se mostró que el análisis del ciclo de vida ha sido utilizado para evaluar los beneficios ambientales de la inclusión de materiales reciclados. Sin embargo, para comprender mejor la interacción de los pavimentos con el medio ambiente se deben realizar más estudios en las diferentes etapas del ciclo de vida como la operación y su relación con los impactos ambientales.

A pesar de que se han desarrollado diferentes sistemas de calificación, su aplicación no se encuentra desarrollada exclusivamente para las estructuras de pavimento, esto conlleva a que se realicen esfuerzos que permitan implementar un sistema exclusivamente para los pavimentos.

Dado que existen diferentes tipos de tecnologías para la extracción y transformación de materia prima, construcción de las estructuras de pavimento y estrategias de mantenimiento, se hace necesario la evaluación de los impactos a través del análisis del ciclo de vida y la implementación de buenas prácticas para el desarrollo de un sistema de calificación de sostenibilidad para entornos como el colombiano.

La literatura encontrada sobre las metodologías de medición de sostenibilidad ambiental proviene principalmente de países de Norte América, Europa y Asia, esto conlleva a realizar esfuerzos para que en Latinoamérica se desarrollen estudios de los impactos de los pavimentos regionales.

2.5. Referencias

- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014a). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., & Yang, R. (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>
- AzariJafari, H., Yahia, A., & Ben Amor, M. (2016a). Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2187–2197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>
- Bahi, H., Mastouri, H., & Radoine, H. (2020). Review of methods for retrieving urban heat islands. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.272>
- Bartolozzi, I., Antunes, I., & Rizzi, F. (2012). The environmental impact assessment of Asphalt Rubber: Life Cycle Assessment. *Proceedings, 5th Asphalt Rubber" Roads of the Future" International Conference (2012)*, 799–819.
- Blaauw, S. A., & Maina, J. W. (2021). Life Cycle Inventory for Pavements - A Case Study of South Africa. *Transportation Engineering*, 3(January), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100049>
- Bon, R., & Hutchinson, K. (2000). Sustainable construction: some economic challenges. *Building Research & Information*, 28(5–6), 310–314. <https://doi.org/10.1080/096132100418465>
- Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Documentos de Las Naciones, Recolección de Un ...*, 416.
- Bryce, J., Brodie, S., Parry, T., & Lo Presti, D. (2017). A systematic assessment of road pavement sustainability through a review of rating tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.002>
- Cao, R., Leng, Z., Yu, H., & Hsu, S.-C. (2019). Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.031>
- Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2015). Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.001>
- Cheung Chan, A. W. (2007). *Economic and Environmental Evaluations of Life Cycle Cost Analysis Practice: A Case Study of Michigan DOT Pavement Projects. Master of Science Thesis Dissertation in the Natural Resource and Environment, University of Michigan* (Issue March).
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., & Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>
- Chowdhury, R., Apul, D., & Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(4), 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>
- Clevenger, C. M., Ozbek, M. E., & Simpson, S. (2013). Review of Sustainability Rating Systems used for Infrastructure Projects. Associated Schools of Construction. *49th ASC Annual*

International Conference Proceedings.

- Dam, T. J. Van, Harvey, J. T., Muench, S. T., D., K. S., Snyder, M. B., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Meijer, J., V., P. R., R., J. R., & Kendall, and A. (2011). *Towards Sustainable Pavement Systems : A Reference Document*. 83(1), 1–16.
- Dam, T. J. Van, Harvey, J. T., Muench, S. T., D., K., Smith, Snyder, M. B., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Meijer, J., V., P., Ram, R., J., Roesler, & Kendall, and A. (2011). *Towards Sustainable Pavement Systems : A Reference Document* (Vol. 83, Issue 1).
- Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., Alsulami, B., & Castro-Fresno, D. (2016b). Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in developing countries. *Ecological Indicators*, 71, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.033>
- Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2017). Methodology for the development of a new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC). *Environmental Science and Policy*, 69, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>
- Ding, T., Xiao, J., & Tam, V. W. Y. (2016). A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. *Waste Management*, 56, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>
- EEA (European Environment Agency). (1999). Environmental indicators : Typology and overview. In *European Environment Agency* (Vol. 25, Issue 25). <http://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>
- Epa, U. S. (2013). *Analysis of Recycling of Asphalt Shingles in Pavement Mixes from a Life Cycle Perspective*.
- Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- Gregory, J. R., Noshadravan, A., Olivetti, E. A., & Kirchain, R. E. (2016). A Methodology for Robust Comparative Life Cycle Assessments Incorporating Uncertainty. *Environmental Science and Technology*, 50(12), 6397–6405. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04969>
- Gulotta, T. M., Mistretta, M., & Praticò, F. G. (2019). A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. *Science of the Total Environment*, 673, 585–593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.046>
- Häkkinen, T., & Mäkelä, K. (1996). Environmental impact of concrete and asphalt pavements. In *Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements, Technical Research Centre of Finland, Espoo*.
- Harvey, J., Kendall, A., Lee, I., Santero, N., Dam, T. Van, Wang, T., & Wang, T. (2010). *Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guideline s*. May.
- Heidari, M. R., Heravi, G., & Esmaeeli, A. N. (2020). Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial

- flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046>
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
- Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2016). Environmental assesment of pavement infrastructure: a systematic review. *J. Environ*, 176, 128–138.
- Islam, S., Ponnambalam, S. G., & Lam, H. L. (2016). Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. *Journal of Cleaner Production*, 136, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.144>
- Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F.H., I., & M. (2006). Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework (No. 2006) ISO. *International Organization for Standardization*.
- Jullien, A., Monéron, P., Quaranta, G., & Gaillard, D. (2006). Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(4), 356–374. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.09.004>
- Kerry A. Griffiths, C. B. (2017). *Title : Comparative assessment of infrastructure sustainability rating tools. April.*
- Knuth, D., & Fortmann, J. (2010). The Development of I-LAST Illinois—Livable and Sustainable Transportation. *Green Streets and Highways 2010*, 495–503. [https://doi.org/10.1061/41148\(389\)40](https://doi.org/10.1061/41148(389)40)
- Kurda, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 139(September 2018), 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>
- Landi, D., Marconi, M., Bocci, E., & Germani, M. (2020). Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119295>
- Lee, J., Edil, T. B., Benson, C. H., & Tinjum, J. M. (2013). Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure: Green Highway Rating System. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000742](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000742)
- Li, H. C. (2019). Smog and Air Pollution: Journalistic Criticism and Environmental Accountability in China. *Journal of Rural Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.10.024>
- Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amirkhanian, S. N. (2019a). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1182–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>
- Loijos, A. (2010). *Sensitivity Analysis of the Life Cycle Environmental Performance of Asphalt and Concrete Pavements*. 1–17.
- MACK, J., Loughalam, A., Gregory, J., Rabdolph, K., Xu, X., M, A., & Ulm, F. (2009). *OVERVIEW OF PAVEMENT LIFE CYCLE ASSESSMENT USE PHASE RESEARCH*. 1–14.
- Maher, M., Kazmierowski, T., & Navarra, M. (2015). Integration of Sustainability Rating Tools in Contemporary Pavement Management Systems. *9th International Conference on Managing Pavement Assets, May 2015*. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/56405/ICMPA9->

000054.PDF?sequence=2&isAllowed=y

- Marinković, S. B., Ignjatović, I., & Radonjanin, V. (2013). Life-cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs). In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 569–604). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.4.569>
- Martinez-Arguelles, G., Crispino, M., Giustozzi, F., & Flintsch, G. W. (2013). Environmental Analysis of Asphalt Pavement Maintenance Using Modified Binders in Developing Countries: Case Study in Bogotá, Colombia. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 1–14.
- Mattinzoli, T., Sol-Sánchez, M., Martínez, G., & Rubio-Gámez, M. (2020). A critical review of roadway sustainable rating systems. *Sustainable Cities and Society*, *63*, 102447. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102447>
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. 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*(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>
- Melizza, M., Díaz, O., Carlos, L., & Silva, M. (2015). Volumen 25-2 CRITERIOS E INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN EL SUBSECTOR VIAL SUSTAINABILITY CRITERIA AND INDICATORS IN THE ROAD CONSTRUCTION SUBSECTOR. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *25*(2), 81–98. <https://doi.org/10.18359/rcin.1433>
- Miliutenko, S., Björklund, A., & Carlsson, A. (2013). Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. *Journal of Cleaner Production*, *43*, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.040>
- Mroueh, U.-M., Eskola, P., & Laine-Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste Management*, *21*(3), 271–277. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00100-8)
- Muench, S. T., Anderson, J., & Bevan, T. (2010). Greenroads: A sustainability rating system for roadways. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *3*(5), 270–279. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2010.3\(5\).270](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2010.3(5).270)
- Nascimento, F., Gouveia, B., Dias, F., Ribeiro, F., & Silva, M. A. (2020). A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *271*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122210>
- North American Sustainable Transportation Council. (2012). *Sustainable Transportation Analysis & Rating System - Pilot Plan Application Manual. Version 1.*, 73. <https://www.sccrtc.org/wp-content/uploads/2014/02/STARS-Pilot-Project-Application-Manual.pdf>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, *23*(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Park, K., Thomas, N. E., & Wayne Lee, K. (2007). Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition. *Journal of Transportation Engineering*, *133*(12), 706–709. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:12\(706\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(706))
- Reid, L., Neuman, T., Davis, A., Bevan, T., & Jeralde, A. (2010). Sustainable Highways Self-Evaluation Tool Sustainable Highways Self-Evaluation Tool. In *October*.
- Roudebush, W. H. (2003). Environmental value engineering: An environmental life cycle assessment methodology for comparing built environment alternatives. *ASEE Annual Conference Proceedings*, 8275–8282.

- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V., & Lo Presti, D. (2019). SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production*, 206, 524–540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.308>
- Sarsam, S. I. (2015). Sustainable and Green Roadway Rating System. *International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences*, 3(3), 99–106. <https://doi.org/10.12983/ijres-2015-p0099-0106>
- Seyfang, G. (2010). Community action for sustainable housing: Building a low-carbon future. *Energy Policy*, 38(12), 7624–7633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.027>
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018a). Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.004>
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018b). Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.004>
- Singh, A., Vaddy, P., & Biligiri, K. P. (2020). Quantification of embodied energy and carbon footprint of pervious concrete pavements through a methodical lifecycle assessment framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104953. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104953>
- Smeets, E. and W., & Others, R. and. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. European Environment Agency Copenhagen.
- Smith, S. H., & Durham, S. A. (2016b). A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbe.2016.01.001>
- Stout, D., Carlson, D., & Douglas, P. E. (2003). *Stack Emissions With Asphalt Rubber A Synthesis of Studies*. 1–15.
- Stripple, H., & Uppenberg, S. (2010). Life Cycle Assessment of Railways and Rail Transports. *Swedish Environmental Research Institute*, 187.
- Suh, S., & Huppel, G. (2005). Methods for Life Cycle Inventory of a product. *Journal of Cleaner Production*, 13(7), 687–697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.04.001>
- Thiel, C., Stengel, T., & Gehlen, C. (2014). Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials. In *Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 368–403). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.368>
- Thompson, M., Haselbach, L., Poor, C., & Wolcott, M. (2013). Integrating green rating systems: A case study for ferry terminals. *Journal of Green Building*, 8(1), 136–150. <https://doi.org/10.3992/jgb.8.1.136>
- Vega-Araujo, D., Martinez-Arguelles, G., & Santos, J. (2020). Comparative life cycle assessment of warm mix asphalt with recycled concrete aggregates: A Colombian case study. *Procedia CIRP*, 90, 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.126>
- Vega, D. L., Gilberto, M. A., & Dos Santos, J. M. O. (2019). Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052016>

- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>
- Xu, X., Noshadravan, A., Gregory, J., & Kirchain, R. (2014). Scenario Analysis of Comparative Pavement Life Cycle Assessment. *International Symposium on Pavement LCA 2014*, 13–26. http://www.ucprc.ucdavis.edu/p-lca2014/media/pdf/Papers/LCA14_ProbabilisticApproach.pdf
- Zhang, W., Zhang, S., Wan, C., Yue, D., Ye, Y., & Wang, X. (2008a). Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall. *Environmental Pollution*, 153(3), 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.09.004>
- Zhang, Y., & Mohsen, J. P. (2018). A Project-Based Sustainability Rating Tool for Pavement Maintenance. *Engineering*, 4(2), 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.001>

Capítulo 3

3. Sistema de calificación de sostenibilidad ambiental de pavimentos rígidos y flexibles con inclusión de materiales reciclados

Cesar A. Castro M, Daniel F. Sabogal M.

Maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia

Resumen

La sostenibilidad se ha convertido en una necesidad fundamental para la evaluación y construcción de proyectos de infraestructura. En este estudio se propone un sistema de calificación de sostenibilidad ambiental basado en los impactos del ciclo de vida de diferentes estructuras de pavimento. Para medir los impactos ambientales se utilizó la metodología del análisis del ciclo de vida propuesta por ISO 14040 en las etapas de materiales, construcción, operación y mantenimiento para mezclas asfálticas tradicionales, mezcla asfáltica con grano de caucho, bases granulares con inclusión de materiales reciclados, residuos de construcción (concreto reciclado) y concretos convencionales. Los resultados obtenidos indican que indistintamente al material utilizado, la etapa de operación es la que mayores impactos genera al medio ambiente y se pueden relacionar directamente con el estado superficial de la capa de rodadura mediante el índice de rugosidad internacional (IRI) y los volúmenes de tránsito. El Sistema de calificación de sostenibilidad propuesto está compuesto por un listado de buenas prácticas resultado de la comparación de impactos obtenidos y permiten reducir las emisiones ambientales en cada una de las etapas del ciclo de vida. La investigación determinó que la aplicación de un conjunto de buenas prácticas permite tener mayor incidencia en la reducción de los impactos, que la selección de un material como única práctica sostenible.

Palabras clave: Sostenibilidad, Pavimentos Sostenibles, Evaluación de Impactos del Ciclo de vida, sistemas de calificación de sostenibilidad.

Abstract

Sustainability has become fundamental for the evaluation and construction of infrastructure projects. This study proposes an environmental sustainability rating system based on the life cycle impacts of pavement structures. The methodology of the life cycle assessment proposed by ISO 14044 was used to assess the environmental impacts, in the materials, construction, operation and maintenance stages for traditional hot mix asphalt (HMA), HMA with crumb rubber, granular bases including recycled materials (RCD and RAP) and conventional concrete. The results obtained indicate that the operation stage is the one with the greatest impact, related to the surface condition of the wearing course measured through the Surface Roughness Index (IRI). The proposed sustainability rating system is composed of a list of best practices that allow the reduction of environmental emissions in each one of the stages of the life cycle. The research has determined that the application of a set of good practices will have a greater impact on the reduction of impacts, as several sustainable alternatives can be applied.

Keywords: Sustainability, Life Cycle, Greenhouse gases, Rating Systems.

3.1. Introducción

Desde el ámbito ingenieril la sostenibilidad se define como la creación de infraestructura que sea ambientalmente responsable, saludable, equitativa y que permita generar beneficios a una comunidad o nación en general (Ortiz et al., 2009), (USGBC, 2017a). En los últimos 20 años se ha adoptado la construcción sostenible o construcción verde (Seyfang, 2010) (Bon & Hutchinson, 2000), con el objetivo de reducir los impactos generados al medio ambiente en todo el ciclo de vida.

Las estructuras de pavimento son unas de las principales fuentes de emisiones medio ambientales (Peng et al., 2015), junto con la producción industrial y el transporte vehicular (Metz et al., 2007)(Bujang et al., 2018), (Ali & Al Nsairat, 2009). Para medir la sostenibilidad de los pavimentos se han desarrollado herramientas basadas en el marco de referencia DPSIR (Estado, presión, repuesta), donde se relacionan las actividades socioeconómicas y los impactos (Smeets & Others, 1999). Consiguiendo metodologías que permiten la formulación de respuestas enfocadas en la reducción de impactos como es el objeto del presente estudio.

3.1.1. Análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (LCA) es una metodología que permite medir la sostenibilidad ambiental a través de la cuantificación de los impactos ambientales generados desde la explotación de los materiales, hasta el final de la vida útil de un producto (Jahanshahloo et al., 2006). El ciclo de vida de las estructuras de pavimentos, presentado en la [Figura 5](#), permite determinar los impactos generados o salidas a partir de las entradas y procesos. Las entradas se estiman como consumo de combustibles y energías, y los procesos son aquellas actividades como explotación, producción y transporte de materiales, procesos de construcción y mantenimiento y uso de los vehículos que contribuyen en la conformación de la estructura de pavimento. Por ende, las salidas corresponden a los impactos generados por la combustión de la maquinaria y equipo utilizadas en los procesos y que se miden en gases efecto invernadero, Smog, material particulado; etc. (AzariJafari et al., 2016b).

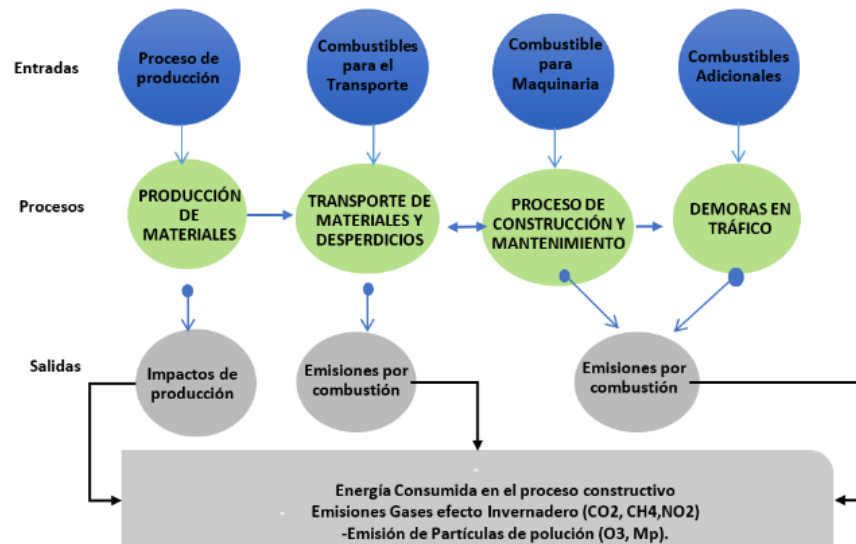


Figura 5. Ciclo de vida de los pavimentos. Modificado de (Wai-Cheung Chan, 2007)

Esta metodología ha sido estudiada en pavimentos principalmente para: mezclas densas en caliente (HMA) (Araújo et al., 2014b), pavimento rígido (W. Zhang et al., 2008b) y pavimentos reciclados

(RAP) (Chiu et al., 2008). Sin embargo, en Colombia es escasa la evidencia sobre la estimación de las cargas ambientales de los materiales usados para la construcción y el mantenimiento de las estructuras de pavimento. Häkkinen & Mäkelä (1996) reportaron una de las primeras evaluaciones del ciclo de vida de los pavimentos, en la que se evaluaron las emisiones de CO₂, el consumo energético, la polución y los metales pesados generados desde la etapa de adquisición de materiales hasta la etapa de operación, sin embargo, los autores no tuvieron en cuenta la etapa de mantenimiento en la evaluación de los impactos del ciclo de vida. Mazumder et al.(2016) evalúan el ciclo de vida para un periodo de análisis de 50 años para un tránsito de 20.000 vehículos/día, en el cual incluye las etapas de extracción de material, producción, construcción, transporte, uso, disposición final y reúso de material para mezclas densas en caliente y mezclas tibias, concluyendo que la etapa de operación genera mayores aportes al calentamiento global y a pesar de la dificultad de reducir emisiones en la etapa de operación, la utilización de nuevos materiales como las mezclas tibias pueden tener la capacidad de reducir hasta un 26% los impactos de todo el ciclo de vida. Por otra parte, Landi et al, (2020) comparan una mezcla densa en caliente con otros materiales encontrando reducciones hasta de un 25%. Sin embargo, las conclusiones y resultados obtenidos son basadas en la unidad funcional determinada en su estudio (m²), lo que hace que la comparación entre diferentes estudios en algunas ocasiones no pueda hacerse de forma directa.

Smith & Durham, (2016a), evaluaron los impactos a lo largo del ciclo de vida para una estructura conformada en pavimento rígido en una unidad funcional de 18.43 kilómetros con dos calzadas de dos carriles a lo largo de un periodo de 50 años, encontrando que los impactos generados corresponden a 3.750.000 kg de CO₂ por km construido. Por su parte Shi et al 2018 reportan 4000000 de kg de CO₂ en una unidad funcional de 4.8 km y dos carriles en un periodo de 20 años. Finalmente, los últimos estudios realizados en el 2020 por Singh y Heidari para una unidad funcional de 1 km reportan emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de 10648000 y 18230000 kg de co₂ por km construido.

Vega et al en el 2019 reportan emisiones de 2680000(kg/t) de CO₂ para una estructura de pavimento conformada por una mezcla tibia con una inclusión de 15% de RCA , 2530000(kg/t) de CO₂ para una inclusión de 30% de RCA y 2890000(kg/t) de CO₂ para una inclusión de 45% RCA. En estudios realizados Vega et al 2020 reportan para una unidad funcional de 1km emisiones de 3380000(kg/km)) de CO₂ para una estructura de pavimento conformada por una mezcla tibia con una inclusión de 15% de RCA, 3650000(kg/km) de CO₂ con una inclusión de 30% de ACR y 367000(kg/km) de CO₂ para una inclusión de 45% de ACR.

Jullien et al, (2006) realizaron estudios del LCA para mezclas con la inclusión de un 30% de RAP en mezclas asfálticas y encontraron reducciones de hasta un 30% de emisiones gases efecto invernadero (Jullien et al., 2006).Aurangzeb et al, (2014) evaluó los impactos ambientales al inclusión de un 30% - 40% y 50% de RAP en mezclas asfálticas encontrando reducciones de hasta un 25% de emisiones gases efecto invernadero (Araújo et al., 2014a) (Aurangzeb et al., 2014).

3.1.2. Análisis de desempeño de los pavimentos

La sostenibilidad vista desde los pavimentos implica garantizar un desempeño deseable durante toda su vida útil (Dam, Harvey, Muench, D., Smith, et al., 2011). Lo que implica medir alguna característica física del mismo y extrapolarla en función a los agentes que lo puedan afectar. Con base a esto, se puede determinar la vida útil de un pavimento, los tipos de mantenimiento y momentos en una línea de tiempo en que se deben aplicar (Nam et al., 2013). Con el incremento del tiempo de servicio el pavimento se ve afectado por las cargas propias del tránsito y por factores ambientales, ya que es propenso a tener problemas generales tales como grietas y hundimientos que terminan volviéndose baches, los cuales representan costos excesivos de mantenimiento (He et al., 2018).

Existen diferentes variables de entrada y criterios para la evaluación de desempeño de pavimentos ya construidos. Por ejemplo: PCI (Pavement Condition index) que es un indicador de condición de

pavimento que se calcula a partir de otros indicadores (Arhin et al., 2015); RQI (Ride Quality Index) valor que puede estar sobre 4 para carreteras nuevas y carreteras seriamente afectadas en 2.5; SR (Surface Rating) sistema de evaluación cualitativa de deterioro de la superficie de rodadura que presenta ahuellamientos o fallas como baches por factores ambientales y RSL (Remaining service life) un valor estimado en años restantes de servicio hasta que el RQI adquiriera valor de 2.5 (Department of Transportation U.S., 2016).

La información de tránsito es uno de los criterios de entrada importantes para el diseño de estructuras de pavimento y para su análisis. Una caracterización precisa de las cargas del tránsito es importante para la evaluación de desempeño del pavimento en la etapa de diseño bajo condiciones climáticas extremas. El tránsito se puede estimar en ejes equivalentes de acuerdo con la metodología desarrollada por AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y en espectros de carga de acuerdo con la tipología de los vehículos en el caso de diseño mecanicista empírico (Hossain et al., 2016).

3.1.3. Sistemas de calificación

La sostenibilidad puede ser mejorada mediante la implementación de certificaciones que pueden actuar como una referencia importante para las entidades encargadas de la toma de decisiones, permitiendo elegir propuestas balanceadas entre el factor ambiental, económico y social que al final beneficiarán a los usuarios de la vía (Bueno et al., 2013). Bajo la perspectiva de hacer los proyectos de ingeniería sostenibles, se han desarrollado iniciativas que permiten medir la afectación al medio ambiente mediante los impactos generados a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de construcción. Por ejemplo, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (Wu et al., 2017), propuesto para calificar edificaciones y BREEAM-CM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology-Communities) para calificar la sostenibilidad en proyectos de desarrollo urbano (Sharifi & Murayama, 2013).

En el caso de la infraestructura vial carretera en los últimos 20 años, varios grupos de investigación en el área de ingeniería de diferentes universidades y departamentos administrativos de vías y carreteras del mundo tales como la Federal Highway Administration, La universidad de Washington, el Instituto de Infraestructura Sostenible de Washington, el Programa Zofnass de Infraestructura Sostenible de la Universidad Harvard y la Federación de Carreteras de la Unión Europea (Melizza et al., 2015) entre otros, han desarrollado e implementado sistemas de calificación de sostenibilidad. Éstos son básicamente un listado de buenas prácticas (sostenibles) asociadas a una métrica común (Dam et al., 2015).

Como sistemas de calificación de sostenibilidad para infraestructura vial se destacan Greenroads, (Muench et al., 2010), Green LITES (Green Leadership In Transportation Environmental Sustainability), (Thompson et al., 2013), INVEST (Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool), (Clevenger et al., 2013), I-LAST (Livable And Sustainable Transportation), (Knuth & Fortmann, 2010) y STARS (Sustainable Transportation Analysis and Rating System) (Sarsam, 2015) entre otros. Si bien estos sistemas tienen años de desarrollo, diferentes estudios y entidades gubernamentales que los respaldan, estos son desarrollados para países de alto nivel económico donde las necesidades difieren con las de países en desarrollo. Por tanto, es necesario realizar un modelo de calificación ajustado a las condiciones colombianas.

Razones comerciales son el objetivo principal de estos sistemas de calificación en países más ricos, con el fin de publicitar la calidad de los proyectos y el interés de los clientes, diseñadores y constructores en sostenibilidad. Mientras que en los países en desarrollo se requiere un enfoque diferente para evaluar todas las contribuciones de sostenibilidad de los proyectos para aportar en su desarrollo (Diaz-Sarachaga et al., 2017). De esta manera, el presente estudio propone una metodología para estimar el concepto de sostenibilidad ambiental de la infraestructura vial carretera en el contexto nacional, a partir de la medición de los impactos ambientales generados a lo largo del

ciclo de vida de las estructuras de pavimento utilizadas con mayor frecuencia en Colombia, mostrando una serie de alternativas acordes con el contexto nacional.

3.2. Materiales y métodos

Se utilizó la metodología del análisis de ciclo de vida para cuantificar los impactos ambientales de cinco estructuras de pavimento conformadas por: pavimento flexible MDC, pavimento flexible con inclusión de residuos de construcción (RCD) compuestos por agregado de concreto reciclado (ACR) y pavimento flexible con inclusión de residuos de asfalto recuperado (RAP) en las capas granulares no ligadas, grano de caucho reciclado (GCR) en la base asfáltica y pavimento rígido convencional. Cada una de ellas soportada en una subrasante con módulos de 35 MPa y 180 MPa y dos tipos de tránsito: medio (T4 =7.000.000 ejes equivalentes de 13 t) y alto (T5 =15.000.000 ejes equivalentes de 13 t).

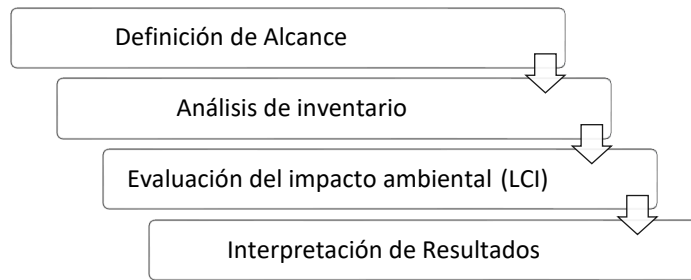


Figura 6. Fases de un Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) de acuerdo con Metodología ISO 14040

El análisis del ciclo de vida de las estructuras de pavimento se enmarca en la metodología ISO 14040 (ISO,2006), que propone cuatro fases (

Figura 6): definición y alcance del objetivo, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental (LCI) y la interpretación de los resultados. Para la evaluación de los impactos del ciclo de vida (LCI) se utilizó el software Athena Pavement LCA, desarrollado por el Athena Pavement Institute el cual cuenta con una base de datos desarrollada a partir de información primaria de la industria de manufactura y construcción en Estados Unidos y Canadá bajo la metodología denominada “*de la cuna a la tumba*” y el análisis químico TRACI (TOOL for REDUCTION and ASSESMENT of Chemicals and other Enviromental Impacts) de EPA (EPA,2011). La información de consumos de combustible y rendimientos de la maquinaria sobre la cual se alimentó el software fue calculada en este estudio a partir de los modelos de maquinaria para construcción de carreteras comercializados en Colombia y sus rendimientos a alturas mayores a los 2000 m.s.n.m a causa de la altimetría donde se proyectó la unidad funcional.

3.2.1. Unidad Funcional

Para la aplicación del LCA se estableció una unidad funcional de 1 km de estructura de pavimento con un periodo de diseño de 30 años, una sección transversal de 7.30 m conformada por dos calzadas, tránsito de diseño (T4 y T5) correspondiente a altos y medios volúmenes de tránsito, la velocidad de operación 60 Km/h, índice de rugosidad internacional (IRI) mínima y máxima de 1.5 y 3.5 m/Km y distancias de acarreo de materiales (20 40 y 60 Km), para la construcción y el mantenimiento de los pavimentos. En los factores ambientales se incluyen la altitud sobre el nivel del mar (2000 m.s.n.m) y la temperatura 15°C, parámetros que inciden en los consumos de combustible y en los rendimientos de la maquinaria.

3.2.2. Límites del sistema

Para el presente estudio se asumió que los límites del sistema del LCA debían incluir la etapa de producción y transporte de materiales, actividades de construcción de cada tipo de pavimento, operación relacionada con la velocidad, tránsito e IRI descritos en la unidad funcional y por último una etapa de mantenimiento.

Las distancias de acarreo de materias primas se tienen en cuenta como variable de estudio, suponiendo 20, 40 y 60 Km de acuerdo el consorcio de Estructuración vial de la variante Tunja, Paipa, Duitama, con el objeto de comparar los impactos que resultan de diferentes distancias y su representatividad en todo el ciclo de vida. No se tienen en cuenta distancias de acarreo de ligantes asfálticos desde las refinerías hasta las plantas de producción.

La etapa de construcción incluye los principales equipos requeridos (Tabla 9) para la construcción de cada tipo de estructura objeto de estudio (**Error! Reference source not found.**) y se presentan los consumos de combustibles típicos de equipos en Colombia Además, en la etapa de operación se utilizó un tránsito tomado a partir de información de estaciones de conteo implementadas por el Invias en 124 corredores del país con parámetros de tránsito similares a los planteados en el estudio propuesto (medios y altos volúmenes de tránsito). Por último, en la etapa de mantenimiento se tomó como referencia el modelo de deterioro realizado en el software HDM4 por el Consorcio Estructuración Vial para la variante Tunja- Paipa-Duitama ubicada en el departamento de Boyacá Colombia, cuyas condiciones de tráfico (TPD 14343) tienen el mismo orden a las tomadas para el diseño de las estructuras de pavimento.

3.2.3. Escenarios de estudio

Definidos los límites del sistema se diseñaron las diferentes estructuras de pavimentos (Figura 7) siguiendo el método mecanicista francés (LCPC- Boletín 125 1983), conformadas en pavimento flexible MDC (estructura de control), pavimento flexible con inclusión de residuos de construcción (RDC) y asfalto recuperado (RAP) en las capas granulares no ligadas, grano de caucho reciclado (GCR) en la base asfáltica y pavimento rígido convencional. Los módulos de elasticidad y las pendientes de las curvas de fatiga de los materiales para las diferentes estructuras de pavimento estudiadas se presentan en la (Tabla 8) y corresponden con las reportadas por (Reyes, 2018).

Tabla 8. Variables entrada diseño de pavimentos (Reyes 2018).

MATERIAL	E(MPa)	σ_6 MPa/	b	SN	Poisson	CAM
Concreto Losas	35000	2.15	-0.0625	1	0.25	1.3
Concreto Pobre 6%	24000	1.63	-0.0666667	1	0.25	1.3
Carpeta de Rodadura	7200	5400	1.50E-04	-0.2	0.25	0.35
Base Asfáltica	12300	9300	9.00E-05	-0.2	0.3	0.35
**Base Asfáltica (GCR)	6969	5500	2.13E-04	-0.159	0.3	0.35

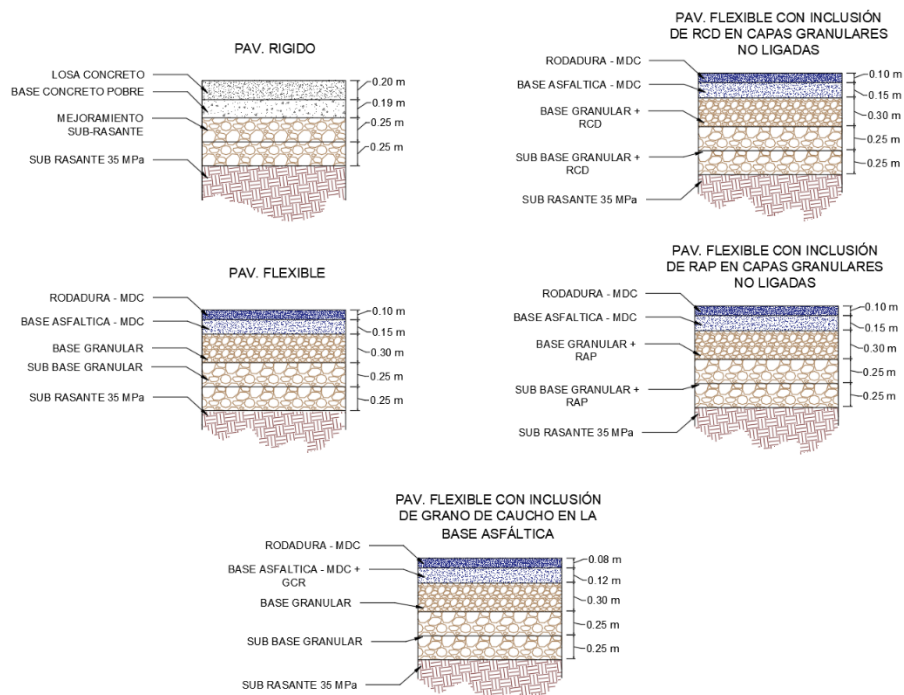


Figura 7. Estructuras de pavimento

En la [Tabla 10](#) se presentan las cantidades de los materiales requeridos para la construcción de cada una de las estructuras de pavimento diseñadas, en la unidad funcional los cuales son necesarios para realizar el análisis de los impactos (LCI). En el proceso de análisis de las etapas del ciclo de vida para el cálculo de los impactos, por un lado, se evaluó la maquinaria que interviene en las etapas de construcción y de mantenimiento de la unidad funcional con las diferentes estructuras, por tanto, en la [Tabla 9](#) se presenta un resumen de la maquinaria utilizada con sus respectivos consumos y rendimientos ajustados a la temperatura de 14°C y a una altura superior a 2000 msnm ya que estas variables afectan los resultados.

Tabla 9 Resumen maquinaria usada

ACTIVIDAD	EQUIPO	CONSUMO COMBUSTIBLE			TASAS DE PRODUCCIÓN	
		TIPO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
Pavimentado MDC	Pavimentadora asfalto	Diesel	0.062	l/t	1215	t/día
Pavimentado MDC	Volqueta	Diesel	0.0009	l/m ²	1000	m ² /hr
Pavimentado MDC	Fresadora	Diesel	0.0438	l/t	1713	t/hr
Pavimentado MDC	Compactador rodillo	Diesel	0.0533	l/t	1215	t/día
Pavimentado MDC	Compactador rodillo	Diesel	0.0237	l/t	2726	t/día
Excavación	camión concreto	Diesel	3.7854	l/m ²	60	m ³ /día
Excavación	Retroexcavadora <50 h	Diesel	0.024	l/m ³	1000	m ³ /día
Excavación	Retroexcavadora > 100 hp <250 hp	Diesel	0.0405	l/m ³	3000	m ³ /día
Excavación	Retroexcavadora > 250 hp	Diesel	0.0572	l/m ³	4000	m ³ /día
Excavación	Retroexcavadora >100 hp <50 hp		0.0356	l/m ³	2000	m ³ /día

De otro lado, para el análisis de la etapa de mantenimiento se tomó como referencia el modelo de deterioro propuesto en el software HDM4 para la variante Tunja- Paipa-Duitama ubicada en el departamento de Boyacá Colombia, cuyas condiciones de tráfico (TPD 14343) tienen el mismo orden a las tomadas para el diseño de las estructuras de pavimento. En este corredor y de acuerdo con la estrategia de mantenimiento, se proponen realizar actividades de sellado de fisuras y de fresado. En el caso de sello de fisuras se realiza al 10% del área de la superficie de la capa de rodadura en periodos no superiores a los cuatro años y con periodos de vida útil de entre 4 y 6 años, mientras que el fresado superficial se realiza en periodos de 12 años con una vida útil de 10 años.

Finalmente, para la etapa de operación se realizó un retro cálculo para determinar el TPDA de vehículos livianos y camiones que transitarían por la unidad funcional de 1 km y cuya tasa de crecimiento para los 30 años de vida útil se realizó a partir de información de estaciones de conteo implementadas por el Invias en 124 corredores del país con parámetros de tránsito similares a los planteados en el estudio propuesto.

Los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida son calculados a partir de la ecuación (1).

$$LCI = \sum I_{(MA)} + \sum I_{(CO)} + \sum I_{(OP)} + \sum I_{(MAN)} \quad (1)$$

Donde I(MA) corresponde a los impactos de la categoría construcción, I(CO) son los impactos de la categoría construcción, I(MAN) son los impactos en la categoría mantenimiento y I(OP) son los impactos en la categoría operación. Para el caso de estudio (unidad funcional) se obtuvieron impactos medidos en efecto invernadero GEI (CO₂), Smog (O₃), material particulado (MP), acidificación (SO₂), depleción de ozono (CFC) y energías no renovables (MJ).

En la evaluación de las emisiones totales se tuvieron en cuenta 6 categorías de impactos y los resultados de las emisiones obtenidas para cada una de las estructuras de pavimento diseñadas se encuentran en la [Tabla 11](#) y la [Tabla 12](#). La conformación de las estructuras de pavimento son una mezcla densa en caliente (MDC) tradicional, mezcla densa en caliente con inclusión de caucho reciclado (GCR), mezcla en caliente con inclusión de asfalto recuperado (RAP), mezcla densa en caliente con inclusión de residuos de construcción en materiales granulares (RCD) y pavimento rígido (PR).

Tabla 10. Materiales necesarios para la conformación de las estructuras de pavimento diseñadas

MATERIAL	UN	MDC 35 MPa		MDC 180Mpa		GCR 35Mpa		GCR 180MPa		RAP 35Mpa		RAP 180 MPa		RDC SR 35 MPa		RDC 180 MPa		PAV. RIGIDO 35MPa			
		T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5	T4	T5		
Emulsión asfáltica	m3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	-	-	
Imprimación.	m3	33.1	18.5	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	-	-	
MDC carpeta rodadura	m3	2,044	730	2,044	2,044	1,898	2,044	1,898	1,825	2,044	2,044	1,898	2,044	2,044	2,044	1,898	2,044	1,898	2,044	-	-
MDC base asfáltica	m3	1,095	1,168	1,095	1,168	481.8	481.8	730	584	1,095	1,168	1,095	1,168	1,095	1,168	1,095	1,168	1,095	1,168	-	-
Base granular	m3	2,007	2,007	1,095	1,095	912.5	912.5	912.5	-	912.5	912.5	-	912.5	912.5	912.5	912.5	-	-	1,825	1,825	
Subbase granular	m3	912.5	912.5	912.5	912.5	-	-	-	-	912.5	912.5	912.5	-	912.5	912.5	912.5	912.5	912.5	1,825	1,825	
Sellante asfáltico	t	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	912.5	70.3	912.5	2.7	2.7
Cucho molido (GCR)	t	-	-	-	-	912.5	912.5	547.5	547.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Asfalto recuperado (RAP)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,095	1,095	1,095	1,095	-	-	-	-	-	-	-	-
Residuos de construcción (RCD)	m3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,095	1,095	1,095	1,095	-	-	-	-
Concreto capa rodadura	m3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,920	2
Concreto pobre	m3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,774	4

Tabla 11. Impactos estructuras de pavimento, subrasante 35 MPa, T4

PAV	IMPACTOS (Ton - equivalentes)					
	GEI	SMOG	MP	AP	ODP	ENR
	t CO ₂ eq.	t O ₃ eq.	t MP 2.5 eq.	t SO ₂ eq	t CFC-11 eq	MJ
MDC	1609.2	255.41	0.61	11.23	1.34E-07	48540.32
GCR	1463.8	226.63	0.57	10.83	8.60E-08	41212.52
RAP	1582.1	252.34	0.65	11.19	2.30E-08	47661.46
RCD	1586.8	253.78	0.66	11.23	1.15E-08	47730.41
PR	2342.3	382.62	2.88	8.99	4.70E-05	16755.25

Tabla 12. Impactos estructuras de pavimento, subrasante 180 MPa, T4

PAV	IMPACTOS (Ton - equivalentes)					
	GEI	SMOG	MP	AP	ODP	ENR
	t CO ₂ eq.	t O ₃ eq.	t MP 2.5 eq.	t SO ₂ eq	t CFC-11 eq	MJ
MDC	1558.7	245.5	0.59	10.8	1.2E-07	47320
GCR	1463.8	228.0	0.56	10.4	7.4E-08	42769
RAP	1509.2	239.6	0.62	10.5	9.6E-08	45598
RCD	1513.9	241.0	0.63	10.9	9.6E-08	45667
PR	2342.4	342.2	1.342	8.16	0.00009	16087

La cuantificación de impactos se presenta en las tablas 11 y 12, en donde se observan las cargas ambientales a lo largo del ciclo de vida producidas en cada estructura de pavimento, no obstante, para el análisis de buenas prácticas de sostenibilidad para definir el sistema de calificación se establecieron como impactos de referencia de análisis los GEI y el MP. Por lo tanto, se hizo especial énfasis en esos resultados. En la [Figura 8](#), se presentan los GEI (CO₂) para los pavimentos estudiados con un tránsito T4, estos evidencian en primer lugar que la implementación de materiales reciclados como el grano de caucho reciclado (GCR), el asfalto recuperado (RAP) y los residuos de construcción (RCD) generan una reducción de emisiones de CO₂ en proporciones de un 9.04%, 1.68% y 1.39% respectivamente, mientras que la utilización de un pavimento rígido tradicional genera un 45.6% más de impactos.

En segundo lugar, la etapa de operación es la que mayores porcentajes de impactos medidos en CO₂ produce a lo largo del ciclo de vida de una estructura de pavimento, con un 32% en promedio, que provienen principalmente de los vehículos que transitan por la vía en su vida útil, estas emisiones dependen directamente del estado superficial de la capa de rodadura, en este caso el IRI. En tercer lugar, tanto la etapa de construcción como de materiales, que sumadas representan alrededor de un 45% de las emisiones de CO₂, sus impactos dependen directamente de las distancias de acarreo y el consumo de combustibles de la maquinaria necesaria para la conformación de la estructura de pavimento. En la [Figura 8](#) se pueden observar las emisiones de CO₂ de cada una de las etapas del ciclo de vida para las estructuras de pavimento estudiadas.

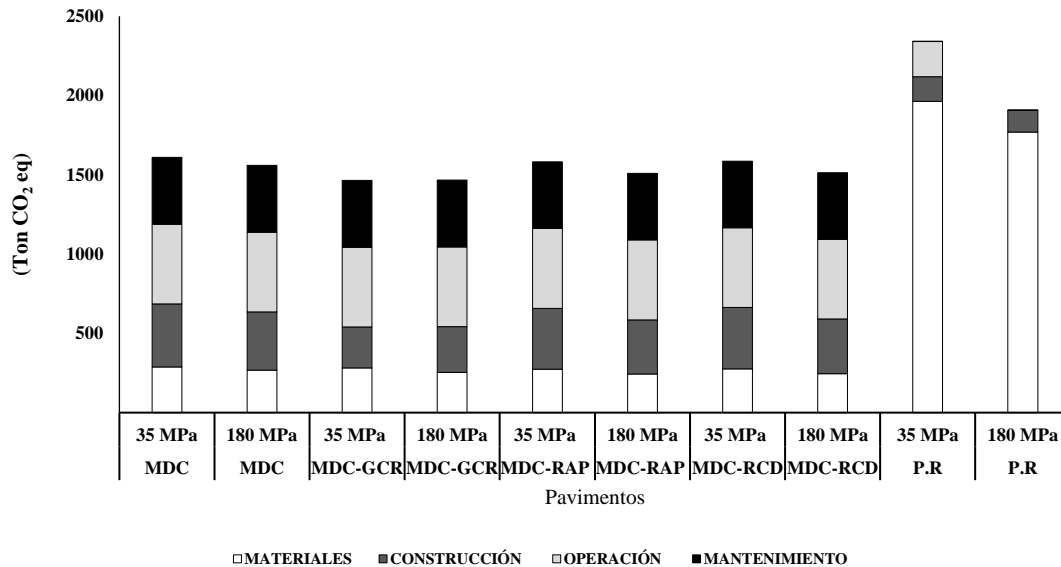


Figura 8. Impactos CO₂ eq. en las diferentes etapas del ciclo de vida para las estructuras de pavimento estudiada y T4

3.3. Resultados

3.3.1. Desarrollo de Categorías de Sistema de Calificación de sostenibilidad

Una vez realizado el análisis de los impactos del ciclo para las unidades funcionales estudiadas, se analizaron las actividades específicas que mayores cargas ambientales generaron dentro de cada una de las etapas del ciclo de vida, lo que permitió proponer un listado de buenas prácticas que contribuyen con la reducción de los impactos. Para este sistema de Calificación de sostenibilidad se proponen cuatro (4) categorías de evaluación generales: materiales (MA), construcción (CO), mantenimiento (MAN) y operación (OP). Cada categoría agrupa un número de prácticas sostenibles que inciden directamente en cada etapa del ciclo de vida estudiado. En la

Tabla 13, se presenta la representatividad de las emisiones en cada etapa del ciclo de vida para cada uno de los pavimentos estudiados bajo un tránsito 4 el cual fue seleccionado para desarrollar el sistema de calificación.

De acuerdo con la Figura 9 las emisiones son sensibles al tránsito y no a la capacidad estructural de la subrasante. Las emisiones para todo el ciclo de vida de una mezcla densa en caliente en una subrasante con módulo resiliente de 35 MPa son de 1600 Ton CO₂ eq, mientras que la misma estructura con un tránsito 5, presenta un total de 3800 Ton CO₂ eq en el ciclo de vida. Si se comparan las capacidades estructurales la misma estructura de pavimento anterior con un módulo resiliente de 180 MPa en la subrasante, la diferencia es una reducción menor al 2% en las emisiones. Del mismo modo las emisiones se concentran en la categoría operación. Por lo anterior para el sistema de calificación propuesto se hace basado en el tránsito 4. Pues es allí donde las cargas ambientales se ven equilibradas en cada una de las etapas del ciclo de vida.

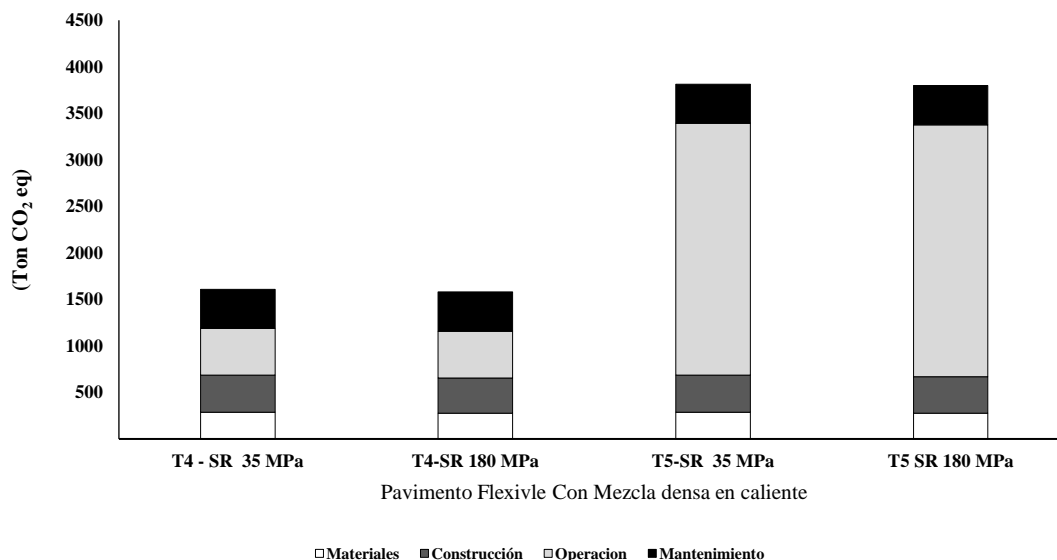


Figura 9. Comparación de Emisiones para diferentes volúmenes de Tránsito y Plataformas de Soporte

Tabla 13. Distribución porcentual de impactos en las etapas del ciclo de vida para tránsito T4.

Estructura	MDC		GCR		RAP		RCD		Promedio	Rígido	
	35	180	35	180	35	180	35	180		Flexible	35
Subrasante (MPa)											
MA (%)	18	17	19	17	17	16	17	16	17	84	83
CO (%)	25	24	18	20	24	23	24	23	22	7	6
MAN (%)	26	27	29	29	27	28	27	28	27	0	0
OP (%)	31	32	34	34	32	33	32	33	33	9	10

Los resultados de la Tabla 13 muestran que, en primer lugar, la categoría de materiales representa en promedio el 17% de las emisiones del ciclo de vida, se encontró que estos impactos son dados por la sumatoria del transporte (2.5%) y manufactura (14.5%) de la materia prima. En segundo lugar, la categoría construcción genera en promedio el 22% de los impactos evaluados en el ciclo de vida, equivalentes a la sumatoria del transporte (2.5%) y equipos utilizados para la conformación de la vía (19.4%). En tercer lugar, la etapa de operación corresponde el 33% de los impactos y, en cuarto lugar, la etapa de mantenimiento genera el 27% de los impactos al sumar el transporte (2.1%) y los equipos (24.9%) para realizar las estrategias de mantenimiento y rehabilitación. Cada una de estas actividades que componen los impactos generados en las diferentes etapas del ciclo de vida se denominaron subcategorías para la ponderación de las prácticas sostenibles. Adicionalmente, con base en los resultados obtenidos se puede afirmar que la calidad de la subrasante no tiene ningún efecto en la generación de cargas ambientales en las etapas del ciclo de vida.

El pavimento rígido no fue incluido en la ponderación de cada categoría de evaluación, éste representa el material con mayores emisiones ya que supera por más de un 45% el total de los impactos del ciclo de vida, en comparación con los otros materiales estudiados (Figura 8). Su inclusión en la ponderación de cada categoría podría alterar la tendencia presentada por los demás materiales (

Tabla 13). Es de anotar que Li et al., (2019) mencionan que la mayoría de los análisis de ciclo de vida se encuentran desarrollados sobre pavimentos flexibles y no sobre los pavimentos rígidos ya que por un lado sus emisiones más representativas se arrojan en la producción de materiales y en los procesos de construcción, mientras que son escasas o nulas en las etapas de mantenimiento y operación. Lo anterior se puede interpretar como una desventaja frente a los demás pavimentos ya que en caso de que la estructura falle, no habrá lugar a mantenimiento, sino que la intervención adecuada sería la reconstrucción lo que generará igual cantidad de carga ambientales de la etapa de materiales y construcción, que en efecto son significativamente mayores que aquellas que ocurren en el mantenimiento de las otras estructuras de pavimento flexible presentadas.

3.3.2. Ponderación de Prácticas Sostenibles

Cada practica sostenible propuesta presenta un potencial de reducción de emisiones determinado y una calificación la cual es directamente proporcional a su capacidad de reducir emisiones. Se propone la Ecuación 2 para estimar la calificación de cada practica propuesta. Existen sistemas de calificación que de acuerdo con la puntuación obtenida otorgan certificaciones clasificadas en diferentes niveles. Para este estudio, el sistema de calificación propuesto no incluye un umbral de certificación. Como resultado final se espera obtener a través de la puntuación un criterio de comparación que facilite la toma de decisiones, A mayor puntuación mayor es la reducción de emisiones, a menor puntuación menor es la reducción de emisiones por lo tanto menor el aporte a la sostenibilidad ambiental. El total máximo de puntuación para el sistema de calificación es de 6 puntos.

$$PTS = \frac{\%R * PCI}{OPR\%} * 100 \quad (2)$$

Donde, PTS es la calificación por cada practica en escala de 1 a 6, PCI es el peso de la subcategoría en todo el ciclo de vida analizado, R Es el valor porcentual de la reducción de emisiones que se puede conseguir con esta práctica en todo el ciclo de vida y OPR es el objetivo principal de reducción de emisiones deseable. Una práctica sostenible para este estudio es aquella que tiene la capacidad de reducir emisiones, sin importar cuanto y en qué etapa. El sistema de calificación propuesto no es cerrado a las practicas descritas en el presente estudio. Cualquier acción frente a la reducción de emisiones genera un impacto positivo. Por lo anterior, cada categoría cuenta con una práctica libre que motiva otros estudios a proponer practicas con capacidad de reducir impactos.

3.3.3. Prácticas sistema de Calificación

En la Tabla 14 se presenta el identificador (ID) de cada buena práctica, la descripción, el porcentaje de reducción de emisiones (%R) que se obtiene de la comparación de análisis de impactos en el ciclo de vida. Los puntos que se le otorgan a cada buena práctica una vez aplicada la ecuación 1 (PTS) y el porcentaje de reducción de emisiones esperado que para este estudio se asumió como un 10% de reducción de emisiones en todo el ciclo de vida (OPR%) (este valor podrá ser variado por quien administre el sistema de calificación de acuerdo con su interés particular frente a la reducción de emisiones, en dicha situación la escala de calificación puede variar).

Tabla 14. Listado de Buenas prácticas categoría Materiales

ID	Buena Práctica	%R	PTS
MA-01	Las distancias de acarreo de material son menores a 20 Km.	1.74	0.17
MA-02	Las distancias de acarreo de material están entre 20 Km y 40 Km.	1.30	0.13

ID	Buena Práctica	%R	PTS
MA-03	Las distancias de acarreo de material están entre 40 Km y 60 Km.	0.78	0.08
MA-04	Uso de RAP (Asfalto Reciclado) en el proyecto	1.6	0.16
MA-05	Uso de ACR (Agregado de Concreto Reciclado) en el proyecto	1.39	0.14
MA-06	Uso de GCR (Grano de Caucho) en el proyecto	9.04	0.90
MA-07	Libre	--	--

El uso de RAP (MA-04) presentó reducción de 1.6% de emisiones en el análisis de ciclo de vida desarrollado (Figura 8). Estudios concluyen que el uso de RAP presenta menor consumo energético y menores impactos debido a que se evita el uso de materiales vírgenes, aun cuando en la producción e instalación de la nueva mezcla asfáltica se adicionan asfaltos donde se requieren consumos energéticos adicionales. En efecto, el RAP sigue presentando reducción de emisiones frente a la comparación con otros materiales como las mezclas tibias (Zheng et al., 2020). Las emisiones en la categoría materiales se ven relacionadas directamente con las distancias de acarreo, Moretti et al., (2018) reportan una reducción de un 26% en distancias menores a 100 km.

Ahora bien, teniendo en cuenta el transporte de materiales, se encontró que la distancia de acarreo entre 0-20 km genera un 67% menos de emisiones que una distancia de entre 60-80 km y 17% menos que una distancia entre 30-40 km (Figura 8). En el total del ciclo de vida los impactos por transporte se reducen entre un 0.7% y 1.7% para la categoría materiales, entre un 0.7% y un 1.7% para la categoría construcción y entre un 0.6% y 1.4% para la categoría Mantenimiento dependiendo de la distancia de acarreo.

Figura 10. Impactos por distancias de acarreo

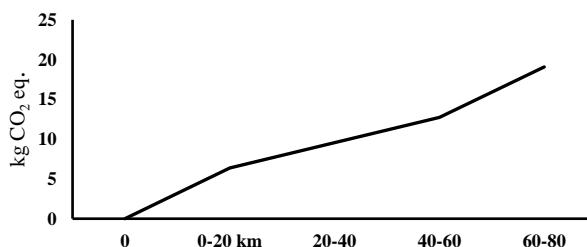


Tabla 15. Listado de Buenas prácticas categoría Construcción

ID	Buena Práctica	%R	PTS
CO-01	Las distancias de acarreo de material son menores a 20 Km.	1.71	0.17
CO-02	Las distancias de acarreo de material están entre 20 Km y 40 Km.	1.27	0.13
CO-03	Las distancias de acarreo de material están entre 40 Km y 60 Km.	0.76	0.08
CO-04	Implementación de equipos de construcción con Tecnología Euro V, Euro VI, superiores y homologables.	19.8	1.98

ID	Buena Práctica	%R	PTS
CO-05	Implementación de equipos de construcción con Tecnología, Euro IV y homologable.	11	1.1
CO-06	Libre	--	--

La implementación de maquinaria con tecnología Euro VI reduce en un 90% los impactos de material particulado (MP) en comparación con la tecnología Euro III, según los porcentajes máximos permitidos establecidos por la Comisión Europea (Comisión Europea, 2012), Pasando de un valor máximo de 50 mg/km para Euro III a uno de 5 mg/km para Euro VI, de igual forma, la tecnología Euro IV reduce en un 50% los impactos por MP ya que su valor máximo de emisiones es de 25 mg/km. Por tanto, el uso de maquinaria y equipos (CO-5, [Tabla 15](#)) para el transporte de materiales y construcción de la estructura de pavimento que cuente con tecnología Euro V o Superior puede representar una reducción de impactos de hasta el 19,80 % en la etapa de construcción y una reducción de 2.0% en las emisiones de todo el ciclo de vida con un 24,3% en la etapa de mantenimiento, lo que representa un 2.4% de reducción de la totalidad de los impactos. De igual manera que un proyecto cuente con maquinaria con tecnología Euro IV puede representar una reducción de impactos de hasta el 50% en la etapa de construcción, materiales y mantenimiento ([Tabla 16](#)).

Tabla 16. Reducción material particulado (kg MP2.5 eq) para una MDC por uso de tecnologías Euro IV y Euro V

	MA	CO	OP	MA	LCI	%R
MDC*	156.7	113.5	171.3	167.5	609.0	0%
EURO IV	143.3	56.7	167.5	171.3	538.9	50%
EURO V - VI	132.7	11.3	167.5	171.3	482.9	90%

La condición superficial de la capa de rodadura incide de forma directa en los impactos generados por el tránsito al circular sobre los pavimentos, concentrando los impactos en la etapa de operación.

En la Figura 11 se observa que cuando se tiene un IRI de 2 m/km se genera una reducción de 21% de emisiones en comparación con un IRI de 3.5 m/km, y un IRI de 1.5 m/km puede llegar a generar hasta un 26% menos de emisiones que un IRI mayor a los 3.5 m/km.

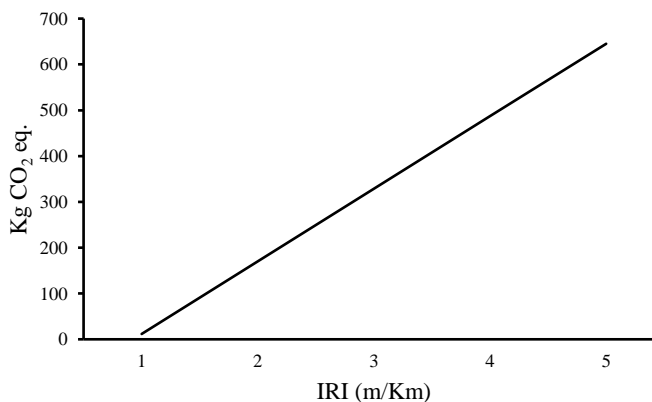


Figura 11. Emisiones por IRI

El estudio realizado por Lidicker et al., 2013 demostró la relación que existe entre el IRI y las emisiones. En su estudio controlaron el IRI evitando que superara 3.4 m/km en una unidad funcional de 1 km para un periodo de diseño de 22 años, consiguiendo una reducción de 25% de emisiones.

Tabla 17. Buenas prácticas categoría operación

ID	Buena Práctica	%R	PTS
OP-01	Garantizar IRI menor o igual a 1.5 m/Km al inicio de la vida útil	26	2.60
OP-02	Garantizar IRI entre 1.5 m/km y 2 m/km al inicio de la vida útil	21	2.10
OP-03	Garantizar IRI entre 2 m/Km y 3 m/km al inicio de la vida útil	7	0.71
OP-04	Libre	--	--

Como parte del desarrollo de la categoría de mantenimiento (MAN) se calcularon los impactos de dos estrategias de rehabilitación: (1) FDR (Full Depth Reclamation) y (2) PDR (Partial Depth Reclamation). Se planteó su aplicación transcurridos 12 años de vida útil en un pavimento flexible tradicional y restableciendo su serviciabilidad por un periodo de 10 años. Los resultados obtenidos indican que la reutilización de materiales en la estrategia de rehabilitación FDR generan 246.32 t CO₂ / km menos que una estrategia tradicional lo que corresponde a un 91.08% menos de emisiones por km de vía rehabilitada en la etapa de mantenimiento y un 17% menos de emisiones en el ciclo de vida.

Varias causas justifican los mayores impactos de la realización de un PDR en comparación con FDR, por ejemplo: mayor transporte de materiales a sitio, mayor transporte de residuos, mayor uso de materiales vírgenes en las actividades de rehabilitación, mayor desperdicio de materiales de sitio, y mayor consumo de combustible de las maquinarias para la extracción y manufactura de los materiales.

Tabla 18. Buenas prácticas categoría mantenimiento

ID	Buena Práctica	%R	PTS
MA-01	Las distancias de acarreo de material son menores a 20 Km.	1.42	0.14
MA-02	Las distancias de acarreo de material están entre 20 Km y 40 Km.	1.06	0.11
MA-03	Las distancias de acarreo de material están entre 40 Km y 60 Km.	0.64	0.06
MA-04	Estrategia de mantenimiento basada en un FDR	24.59	2.46
MA-05	Implementación de equipos de construcción con Tecnología Euro V, Euro VI, superiores y homologables.	24.3	2.43
MA-06	Implementación de equipos de construcción con Tecnología, Euro IV y homologable.	13.50	1.35
MA-07	Uso de ACR (Agregado de Concreto Reciclado) en el proyecto	1.39	0.14
MA-08	Uso de RAP (Grano de Caucho) en el proyecto	1.60	0.160
MA-09	Libre	--	--

3.3.4. Ejemplo de aplicación

El sistema de calificación propuesto busca facilitar la toma de decisiones, representándolas mediante un valor numérico directamente relacionado con emisiones de las diferentes alternativas estudiadas en todo el ciclo de vida, como se ha explicado a lo largo del presente estudio.

De acuerdo con la Figura 12 el primer paso para su aplicación consiste en identificar las prácticas que puedan ser aplicadas en el proyecto de acuerdo con el contexto general del mismo: ubicación, presupuesto, distancias de acarreo, intención, maquinaria, materiales etc., Luego se comparan las prácticas que se puedan aplicar con las propuestas en el sistema de calificación (Ver Tabla 14, Tabla 15, Tabla 17 y Tabla 18) y aquellas que coincidan se les da la calificación como el sistema de calificación lo propone. El último paso es hacer la sumatoria para obtener la puntuación final, de donde se podrá interpretar que conjunto de prácticas presenta mayor puntuación y así mismo mayor favorabilidad. La idea del sistema de calificación es usarlo antes de iniciar los proyectos y así mismo poder iterar hasta conseguir el resultado deseado.



Figura 12. Secuencia de Aplicación sistema de Calificación

Para el ejemplo de aplicación se eligió un caso hipotético de vía con un ancho de calzada de 7.3 m, una calzada y dos carriles, planteando 4 conjuntos de prácticas sostenibles diferentes (A1, A2, A3 y A4) descritas en la (Tabla 19) y que son muy similares a las condiciones de los proyectos concesionados en el país.

Tabla 19. Alternativas hipotéticas para aplicación de Sistema de Calificación

No.	Características	A1	A2	A3	A4
1	Distancias acarreo de material (km)	25	18	70	10
2	Distancias de acarreo de maquinaria (km)	0	25	40	150
3	Materiales incluidos en pavimentos	MDC	RAP	PR	ACR
4	Tecnología equipos de construcción (EURO)	V	III	VI	IV
5	Tecnología equipos de mantenimiento (EURO)	III	III	V	VI

6	Distancias acarreo de material y maquinaria en mantenimiento (km)	25	18	70	10
7	Materiales usados en mantenimiento	ACR	RAP	PDR	FDR
8	IRI mínimo Después de construcción y mantenimiento m/km	NA	1,5	3	2.5

Una vez identificadas las principales características comparables con las practicas propuestas en el sistema de calificación planteado en la [Tabla 14](#), [Tabla 15](#), [Tabla 17](#) y [Tabla 18](#), se puntuó cada alternativa obteniendo los siguientes resultados: La alternativa A1 obtuvo un resultado de 2.5, A2 de 3.0 , A3 de 5.8 y A4 de 5.2. La [Figura 13](#) presenta la comparación de cada alternativa evaluada identificando el impacto de la calificación por cada etapa.

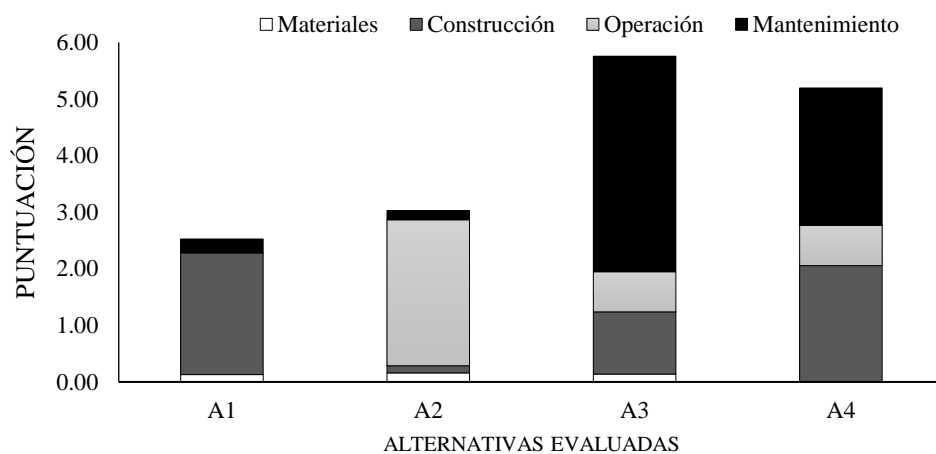


Figura 13. Comparación de Alternativas Evaluadas Con el Sistema de Calificación

El sistema de calificación de sostenibilidad permite identificar que la alternativa 3 es la que mayor puntuación presenta dado que en general presenta una menor distancia de acarreo de materiales, una maquinaria más moderna para los procesos constructivos y una estrategia de mantenimiento basada en un Full Depth Reclamation. Así mismo se puede ver en la [Figura 13](#) que la alternativa 3 presenta un indicador favorable en la categoría de mantenimiento frente a las demás alternativas. Por otra parte, la alternativa 2 presenta una mayor calificación en la categoría operación que la alternativa 3, no obstante, no fue suficiente para superar la puntuación. La alternativa A1 tampoco presenta puntuación en la categoría Operación puesto que los datos de entrada no tienen en cuenta el IRI como indicador de la alternativa.

La alternativa A1 y A2 por su parte presentan el mayor indicador en la categoría Construcción (CO). Sin embargo, en su puntuación general son las dos alternativas que menor calificación sostenible presentan. El anterior ejemplo permite identificar la favorabilidad de cualquier decisión e identifica su eficiencia. Lo cual hace del sistema de calificación propuesto una herramienta que permite la elección de una característica cualitativa mediante su entendimiento a través de un valor cuantitativo.

3.4. Discusión

Los países en vía de desarrollo como Colombia tienden a preferir indicadores medidos en función del cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias (Díaz-Sarachaga et al., 2016). De acuerdo con las políticas de sostenibilidad para la infraestructura del transporte en Colombia, el enfoque de desarrollo se ha centrado en el avance físico de las obras sin contar con un análisis integral en los componentes técnico, ambiental, social, económico, financiero e institucional durante

el ciclo de vida de los proyectos (INVIAS, 2020). Razones comerciales son el objetivo principal de sistemas de calificación en países más ricos (ENVISION (EEUU) (ISI, 2012) , CEEQUAL (BRE Group, 2020), IS Rating Tool (Australia) (ISCA, 2012)), con el fin de publicitar la calidad de los proyectos y el interés de los clientes, diseñadores y constructores en sostenibilidad. Mientras que en los países en desarrollo se requiere un enfoque diferente para evaluar todas las contribuciones de sostenibilidad de los proyectos para aportar en su desarrollo (Diaz-Sarachaga et al., 2017).

La producción de materiales y la etapa de construcción fueron protagonistas en diferentes estudios de Ciclo de vida por mucho tiempo con la iniciativa de reutilización y reciclaje de diferentes materiales, mientras que la etapa de operación fue excluida del ciclo de vida (Inyim et al., 2016). Algunos autores consideran el tránsito vehicular como la etapa de operación en el ciclo de vida del transporte y no en el ciclo de vida de un proyecto vial (Stripple & Uppenberg, 2010), debido a que el tránsito no puede ser estimado de forma precisa en todo el ciclo de vida (Barandica et al., 2013). En los últimos años la etapa operación ha tomado mayor importancia, a causa de la estrecha relación entre la condición superficial de los pavimentos y los impactos ambientales. Los impactos ambientales resultantes de la etapa de operación pueden ser 700 veces superiores al compararse con los demás impactos en términos de consumo de energía y producción de gases efecto invernadero, demostrando su importancia (Lidicker et al., 2013). Los impactos en la etapa de operación se desarrollan usando métodos que asumen los impactos iguales entre diferentes unidades funcionales debido a que su origen es el consumo de combustible del tránsito estimado (Dossche et al., 2017; Karlsson et al., 2012). Sin embargo, existen modelos que predicen los consumos de combustible y emisiones de acuerdo con el nivel de tráfico y la resistencia a rodar que opone el pavimento durante todo el ciclo de vida (Araújo et al., 2014b)

Los resultados obtenidos en este estudio una vez realizada la evaluación de los impactos del ciclo de vida (LCI) coinciden en que la etapa de operación es la que mayores emisiones ambientales genera a lo largo de la vida útil de la estructura de pavimento, con un promedio del 40% del total de las emisiones relacionado directamente con el estado superficial de la capa de rodadura a través IRI, por lo cual una buena práctica ambiental es limitar el IRI a un valor 3,5 m/km o menor. El software Athena Pavement LCA fue utilizado para medir los impactos en el ciclo de vida de este estudio ya que incluye el etapa de operación y/o uso, estimando las emisiones a causa de la interacción rueda pavimento utilizando los modelos HDM IV y PVI Gen I (Alam et al., 2020). Adicional mente Wang et al. (2012), presentan en su estudio que diferentes materiales pueden presentar diferentes impactos en la etapa de operación (Wang et al., 2012) y Taylor et al., 2000 menciona que el 72% de los impactos pueden tener su origen en la etapa de operación en vías de altos volúmenes de tránsito (Taylor & Patten, 2006).

En los estudios de análisis de ciclo de vida es importante contar con datos de entrada precisos y acordes a las condiciones nacionales. Actualmente frente al tránsito fueron utilizadas las estaciones de conteo de INVIAS lo que le da representatividad al estudio para el caso de Colombia y bajo los límites del sistema establecidos. Sin embargo, en Colombia son escasas las bases de datos con los inventarios de impactos en todo el ciclo de vida para diferentes tipos de actividades relacionadas con infraestructura. Otros estudios fueron desarrollados con inventarios acordes a las condiciones regionales como por ejemplo (Weiland & Muench, 2010) uso bases de datos del estado de Washington EEUU, (Mukherjee & Cass, 2012) usaron datos de Michigan y (Wang et al., 2012) tomo su información de Bases de datos de California, haciéndolos representativos para ya que los datos correspondieron a los lugares donde se desarrollaron los análisis.

3.5. Conclusiones

El presente estudio tiene como ventaja frente a otros sistemas de calificación que involucra los impactos resultados del análisis del ciclo de vida como parte fundamental en el criterio de evaluación. Otra ventaja importante es que incluye la etapa de operación en el ciclo de vida y que las practicas aquí propuestas son cercanas a las tecnologías y necesidades de un país en desarrollo como Colombia. No obstante, como desventaja, Colombia no cuenta con una base de datos propia para los cálculos de impactos ambientales producidos por contaminantes generados en todas las etapas del ciclo de vida de un pavimento, lo que constituye una brecha importante para futuros casos de estudio donde se pudieran estimar dichos impactos y metodologías de cálculo en el ciclo de vida de acuerdo con casos de estudio desarrollados en el país.

Como se observó en términos de emisiones, la conformación de las estructuras de pavimento con materiales reciclados genera una reducción entre el 1% y el 9% de los impactos, dado que se requiere una menor cantidad de combustibles necesarios para la explotación, transformación y transporte de materiales vírgenes que se ven traducidos en emisiones ambientales. Aunque algunos materiales proveen solamente un 1% de reducción que se puede interpretar como insignificante, otras prácticas pueden alcanzar hasta el 9% lo que se considera importante a la hora de contabilizar emisiones. Esto implica que en países como Colombia se debe impulsar el uso de este tipo de materiales para garantizar una mejora en la sostenibilidad ambiental de los proyectos de infra estructura vial carretera, en efecto es necesario estudiar aquellos impactos que producirán nuevos materiales alternativos.

Las distancias de acarreo contribuyen de manera importante en las emisiones especialmente en las etapas de materiales, construcción y mantenimiento, por lo cual una buena práctica ambiental es limitar los acarreos a una distancia de entre 0-20 km, ya que la implementación de esta práctica puede reducir en alrededor de un 67% las emisiones por el transporte de materiales, maquinaria y equipo. Por tanto, es importante ubicar fuentes de extracción de material cercanas al proyecto, mejorar propiedades mecánicas de materiales de ser necesario, incentivar el uso de motores de última tecnología que limiten las emisiones generadas, así como buscar maquinaria que funcione con combustibles menos contaminantes como es el gas y los biocombustibles.

Los resultados generales concluyen que no es correcto atacar una sola actividad para hacer una estructura de pavimento sostenible, el solo hecho de trabajar con un material reciclado no garantiza una importante reducción de emisiones, por el contrario, con la propuesta de un sistema de calificación se demuestra que la aplicación de un conjunto de buenas prácticas en todas las etapas del ciclo de vida permitirá tener una mayor incidencia en la reducción de los impactos, al generar varias alternativas.

3.6. Trabajo Futuro

El presente estudio propone una metodología para convertir una práctica considerada sostenible en una métrica común que permita su comparación. Para futuras nuevas prácticas bajo la metodología propuesta se deberá hacer el análisis de ciclo de vida de dicha práctica o ver en qué etapa del ciclo de vida esta práctica puede tener mayor incidencia. Si se demuestra que es capaz de reducir los impactos podrá ser parte del sistema de calificación.

Se resalta la importancia de desarrollar y estudiar nuevas estrategias con el objeto de conocer los impactos tales como: (1) el uso de nuevas alternativas de materiales que son tendencia como: UHPC, inclusión de ICOPOR, vidrio molido, residuos de construcción de diferentes tipos, inclusión de desechos industriales. Implementar un nuevo listado de prácticas constructivas, así como estrategias en la etapa de uso u operación y observar si tienen capacidad de reducir las emisiones ambientales; (2) evaluar como el diseño geométrico de la estructura (curvatura, pendiente) puede influir en los impactos generados en las diferentes etapas del ciclo de vida y (3) en general agregar practicas sostenibles que se enfoquen en todas las diferentes áreas que pueda tener un proyecto de infraestructura, no solo en pavimentos.

Del mismo modo es importante plantear una línea de investigación que permita generar inventarios de impactos en el ciclo de vida. A través de cooperación institucional y empresarial, y a través de estudios de caso particulares asociados a infraestructura vial.

3.7. Referencias

- Alam, M. R., Hossain, K., & Bazan, C. (2020). A systematic approach to estimate global warming potential from pavement vehicle interaction using Canadian Long-Term Pavement Performance data. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123106>
- Ali, H. H., & Al Nsairat, S. F. (2009). Developing a green building assessment tool for developing countries – Case of Jordan. *Building and Environment*, 44(5), 1053–1064. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.015>
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014a). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014b). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Arhin, S. A., Williams, L. N., Ribbiso, A., & Anderson, M. F. (2015). Pavement Condition Index, International Roughness Index, Ride Quality, Prediction, Urban Areas; Pavement Condition Index, International Roughness Index, Ride Quality, Prediction, Urban Areas. *Journal of Civil Engineering Research*, 2015(1), 10–17. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20150501.02>
- Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., & Yang, R. (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>
- AzariJafari, H., Yahia, A., & Ben Amor, M. (2016a). Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2187–2197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>
- Barandica, J. M., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J. A., & Acosta, F. J. (2013). Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. *Journal of Cleaner Production*, 57, 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.036>
- Bon, R., & Hutchinson, K. (2000). Sustainable construction: some economic challenges. *Building Research & Information*, 28(5–6), 310–314. <https://doi.org/10.1080/096132100418465>
- BRE Group. (2020). <https://www.ceequal.com>. <https://www.ceequal.com/>
- Bueno, P. C., Vassallo, J. M., & Cheung, K. (2013). *Road Infrastructure Design for Optimizing Sustainability*. 1–6. <https://doi.org/10.1057/9781137364098.0005>
- Bujang, M., Hainin, M. R., Abd Majid, M. Z., Idham Mohd Satar, M. K., & Azahar, W. N. A. W. (2018). Assessment framework for pavement material and technology elements in green highway index. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1240–1246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.002>
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., & Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>
- Clevenger, C. M., Ozbek, M. E., & Simpson, S. (2013). Review of Sustainability Rating Systems used for Infrastructure Projects. Associated Schools of Construction. *49th ASC Annual International Conference Proceedings*.
- Dam, T. J. Van, Harvey, J. T., Muench, S. T., D., K. S., Snyder, M. B., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Meijer, J., V., P. R., R., J. R., & Kendall, and A. (2011). *Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document*. 83(1), 1–16.
- Dam, T. J. Van, Harvey, J. T., Muench, S. T., Smith, K. D., Snyder, M. B., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Meijer, J., Ram, P. V., Roesler, J. R., & Kendall, A. (2015). *FHWA-HIF-15-002 - Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document*.
- Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2017). Methodology for the development of a

- new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC). *Environmental Science and Policy*, 69, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>
- Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>
- Häkkinen, T., & Mäkelä, K. (1996). Environmental impact of concrete and asphalt pavements. In *Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements, Technical Research Centre of Finland, Espoo*.
- Hossain, N., Singh, D., & Zaman, M. (2016). Sensitivity of traffic input parameters on rutting performance of a flexible pavement using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(6), 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.09.003>
- INVIAS. (2020). *Política de sostenibilidad para la Infraestructura de Transporte del Instituto Nacion de Vías INVIAS*.
- Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2016). Environmental assesment of pavement infrastructure: a systematic review. *J. Environ*, 176, 128–138.
- ISCA. (2012). *Infrastructure Sustainability Rating Tool*. www.isca.org.au
- ISI. (2012). *ENVISION*. www.sustainableinfrastructure.org
- Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F.H., I., & M. (2006). Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework (No. 2006) ISO. *International Organization for Standardization*.
- Jullien, A., Monéron, P., Quaranta, G., & Gaillard, D. (2006). Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(4), 356–374. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.09.004>
- Karlsson, R., Carlson, A., & Dolk, E. (2012). *Energy use generated by traffic and pavement maintenance - Decision support for optimization of low rolling resistance maintenance treatments*.
- Knuth, D., & Fortmann, J. (2010). The Development of I-LAST Illinois—Livable and Sustainable Transportation. *Green Streets and Highways 2010*, 495–503. [https://doi.org/10.1061/41148\(389\)40](https://doi.org/10.1061/41148(389)40)
- Landi, D., Marconi, M., Bocci, E., & Germani, M. (2020). Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119295>
- Li, H. C. (2019). Smog and Air Pollution: Journalistic Criticism and Environmental Accountability in China. *Journal of Rural Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.10.024>
- Lidicker, J., Sathaye, N., Madanat, S., & Horvath, A. (2013). Pavement resurfacing policy for minimization of Life-Cycle costs and greenhouse gas emissions. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(2), 129–137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000114)
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. 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(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>
- Melizza, M., Díaz, O., Carlos, L., & Silva, M. (2015). Volumen 25-2 CRITERIOS E INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN EL SUBSECTOR VIAL SUSTAINABILITY CRITERIA AND INDICATORS IN THE ROAD CONSTRUCTION SUBSECTOR. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 81–98. <https://doi.org/10.18359/rcin.1433>
- Metz, B., Meyer, L., & Bosch, P. (2007). Climate change 2007 mitigation of climate change. In *Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change* (Vol. 9780521880). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>
- Moretti, L., Mandrone, V., D'Andrea, A., & Caro, S. (2018). Evaluation of the environmental and human health impact of road construction activities. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1004–1013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.250>
- Muench, S. T., Anderson, J., & Bevan, T. (2010). Greenroads: A sustainability rating system for roadways.

International Journal of Pavement Research and Technology, 3(5), 270–279.
[https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2010.3\(5\).270](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2010.3(5).270)

- Mukherjee, A., & Cass, D. (2012). Project emissions estimator: implementation of a project-based framework for monitoring the greenhouse gas emissions of pavement. *Transportation Research Record*, 2282(1), 91–99.
- Nam, B. H., Murphy, M. R., Zhang, Z., & Arellano, M. (2013). Improved Structural Condition Index for Pavement Evaluation at Network Level. *Airfield and Highway Pavement 2013*, 781–790.
<https://doi.org/10.1061/9780784413005.064>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., & Zhan, Y. (2015). Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2(2), 116–124.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.005>
- Reyes, F. A. (2018). *Diseño racional de pavimentos*. (J. Cañas (ed.); 5th ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarsam, S. I. (2015). Sustainable and Green Roadway Rating System. *International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences*, 3(3), 99–106. <https://doi.org/10.12983/ijres-2015-p0099-0106>
- Seyfang, G. (2010). Community action for sustainable housing: Building a low-carbon future. *Energy Policy*, 38(12), 7624–7633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.027>
- Sharifi, A., & Murayama, A. (2013). A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 38, 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.006>
- Smeets, E. and W., & Others, R. and. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. European Environment Agency Copenhagen.
- Smith, S. H., & Durham, S. A. (2016a). A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.01.001>
- Stripple, H., & Uppenberg, S. (2010). Life Cycle Assessment of Railways and Rail Transports. *Swedish Environmental Research Institute*, 187.
- Taylor, G., & Patten, J. (2006). *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption - Phase III*.
- Thompson, M., Haselbach, L., Poor, C., & Wolcott, M. (2013). Integrating green rating systems: A case study for ferry terminals. *Journal of Green Building*, 8(1), 136–150. <https://doi.org/10.3992/jgb.8.1.136>
- Wang, T., Lee, I.-S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.-B., & Kim, C. (2012). Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, 33, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>
- Weiland, C., & Muench, S. (2010). *Life Cycle Assessment of Portland Cement Concrete Interstate Highway Rehabilitation and Replacement*.
- Wu, P., Song, Y., Shou, W., Chi, H., Chong, H.-Y., & Sutrisna, M. (2017). A comprehensive analysis of the credits obtained by LEED 2009 certified green buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.007>
- Zhang, W., Zhang, S., Wan, C., Yue, D., Ye, Y., & Wang, X. (2008b). Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall. *Environmental Pollution*, 153(3), 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.09.004>
- Zheng, X., Easa, S. M., Ji, T., & Jiang, Z. (2020). Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121466>

