

02-003

LIFE CYCLE ASSESSMENT IN ROADS: FUTURE TRENDS AND CHALLENGES

Picardo, Alberto (1); Soltero Sánchez, Victor M. (1); Martín-Mariscal, Amanda (1); Peralta , M. Estela (1)

(1) Universidad de Sevilla

Roads cause a high environmental impact characterized by use of materials, energy consumption, emission of greenhouse gases and ecosystem modification. The European Horizon 2030 challenges will imply mandatory changes in the environmental management of this type of infrastructure throughout its life cycle (extraction of raw material, construction, use, maintenance, conservation, exploitation, dismantling - where it is necessary - and end of life). Currently, and with the objective of establishing improvements in terms of sustainability, tools such as Life Cycle Assessment (LCA) are useful for evaluating, prioritizing actions and certifying the environmental performance of any system, process or product. But one of the main problems for its application in the design and analysis and execution of civil infrastructures is the collection of data for the correct elaboration of the Life Cycle Inventory (mandatory requirement of the analysis according to ISO 14040). The complexity linked to the inventory has caused a low use of the method in the sector. This paper analyzes the suitability and compatibility of the tools, methodologies and databases available, establishing future adaptation needs of the LCA and other environmental analysis and certification tools for the life cycle of roads.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Civil Engineering; Environmental product declaration (EPD); Environmental Assessment; Life Cycle Costing (LCC)

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN INFRAESTRUCTURAS CIVILES: TENDENCIAS Y RETOS FUTUROS

Las carreteras y los elementos que las integran provocan un alto impacto ambiental caracterizado por el uso de materiales, el consumo energético, la emisión de gases de efecto invernadero y la modificación del ecosistema. Los retos europeos Horizonte 2030 implicarán cambios obligatorios en la gestión ambiental de este tipo de infraestructuras durante todo su ciclo de vida. Actualmente, y con el objetivo de establecer mejoras en términos de sostenibilidad, las herramientas como Análisis de Ciclo de Vida (ACV) son útiles para evaluar, priorizar actuaciones y certificar el desempeño ambiental de cualquier sistema, proceso o producto. Pero uno de los principales problemas para su aplicación en el diseño y construcción de estas infraestructuras es la recopilación de datos para la elaboración correcta del Inventario de Ciclo de Vida (requerimiento obligatorio del análisis según la normativa ISO 14040). La complejidad ligada al inventario, ha provocado una baja utilización del método en este sector. Este trabajo analiza la idoneidad y compatibilidad de las herramientas, metodologías y bases de datos disponibles, estableciendo las necesidades futuras de adaptación del ACV y otras herramientas de análisis y certificación ambiental al ciclo de vida de carreteras.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV); Ingeniería Civil; Declaración Ambiental de Producto; Evaluación ambiental; Análisis de costes del ciclo de vida

Correspondencia: mperalta1@us.es



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Las carreteras y los elementos que las integran provocan un alto impacto ambiental caracterizado por el uso de materiales, el consumo energético, la emisión de gases de efecto invernadero y la modificación del ecosistema. Los retos europeos Horizonte 2030 implicarán cambios obligatorios en la gestión ambiental de este tipo de infraestructuras durante todo su ciclo de vida.

Específicamente, la construcción de carreteras consume elevadas cantidades de recursos. El empleo de materias primas vírgenes y la extracción de áridos naturales todavía es predominante provocando la modificación del paisaje y alteración del ecosistema (Birgisdottir, 2005), a pesar de la creciente tendencia de aprovechamiento de materiales de residuo con prestaciones y propiedades similares o superiores a los convencionales (Poulikakos et al., 2017). También son destacables los impactos asociados al consumo de combustibles fósiles, energía y la emisión de gases de efecto invernadero ligados a los servicios e instalaciones de una carretera, como la iluminación, el drenaje, la electricidad o las telecomunicaciones. Esto hace que estas infraestructuras causen un daño directo importante en el ecosistema (fragmentación y alteración del hábitat, modificación de los patrones de flujo hídrico, ruido, luz artificial, contaminación o efectos sobre la biótica) y de forma indirecta, contribuyan al cambio climático, al agotamiento de combustibles fósiles o al daño a la salud humana, entre otros.

Actualmente, y con el objetivo de establecer mejoras en términos de sostenibilidad, las herramientas como Análisis de Ciclo de Vida (ACV) son útiles para evaluar, priorizar actuaciones y certificar el desempeño ambiental de cualquier sistema, proceso o producto. Pero uno de los principales problemas para su aplicación en el diseño y construcción de estas infraestructuras es la recopilación de datos para la elaboración correcta del Inventario de Ciclo de Vida (requerimiento obligatorio del análisis según la normativa ISO 14040). La complejidad ligada al inventario ha provocado una baja utilización del método en este sector.

Este trabajo analiza la idoneidad y compatibilidad de las herramientas, metodologías y bases de datos disponibles, estableciendo las necesidades futuras de adaptación del ACV y otras herramientas de análisis y certificación ambiental al ciclo de vida de carreteras.

2. Análisis de ciclo de vida aplicado a carreteras

Desde los primeros estudios sobre impactos ambientales orientados a productos de consumo en los años 70 (Guinée et al., 2002) y a raíz del cambio de enfoque en el diseño y evaluación de edificios desde una perspectiva del ciclo de vida para potenciar el uso de recursos renovables (Bekker, 1982), el interés en el desarrollo de conocimiento, métodos y herramientas de análisis de impacto sigue presente en la actualidad. Después de un periodo donde con frecuencia la estrategia sostenible era un reclamo de mercado (greenwashing) haciendo uso de resultados que no eran verificables ni rigurosos, la comunidad científica advirtió de la necesidad de un consenso de aplicación y uso de las técnicas de análisis de impacto en el ciclo de vida de productos, procesos o servicios. A partir de la década de los 90, un conjunto de expertos liderados por la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) llevaron a cabo publicaciones de guías técnicas y buenas prácticas concluyendo, en el año 1993, con el establecimiento de un marco de trabajo para la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Consoli et al., 1993). Finalmente, en el año 1998 la Organización Internacional de Normalización (ISO) armonizó el procedimiento en las normas de la serie ISO 14040, incorporando un “marco de referencia metodológico” en la UNE-EN ISO 14040 (AENOR, 2006b) y UNE-EN ISO 14044 (AENOR, 2006a).

En la actualidad, el análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología ampliamente utilizada para evaluar el impacto ambiental, económico y social de cualquier producto, proceso y servicio en su ciclo de vida (AENOR, 2006b). La normativa permite una aplicación

estructurada del procedimiento en cualquier sector, aunque la tendencia actual es la adaptación de estos estándares a diferentes actividades económicas, es decir, se fomenta el desarrollo de normativa específica para adecuar los modelos de cálculos de impactos a cada sistema-producto y facilitar la aplicación de la metodología. En concreto, en el sector de la construcción, esta tendencia se inicia en 2003 (SETAC, 2003) y continúa con la creación de diferentes comités técnicos (específicamente, dentro de la Organización Internacional de Normalización ISO el CT59 “Construcción de Edificios” y dentro del Comité Europeo de Normalización CEN, el CT 350 “sostenibilidad en trabajos de construcción”), cuyos objetivos son desarrollar normas y estándares para la evaluación de la sostenibilidad en la construcción, como por ejemplo, citando algunas normativas:

- UNE-EN 15978:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.
- UNE-EN ISO 14025:2010: Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos. (ISO 14025:2006)
- UNE-EN ISO 14026:2018: Etiquetas y declaraciones ambientales. Principios, requisitos y directrices para la comunicación de información sobre huellas. (ISO 14026:2017).
- UNE-EN 15804:2012+A1:2014. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.
- UNE-EN 15942:2013. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Formato de comunicación negocio a negocio.
- UNE-EN 15643-5:2018. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios y las obras de ingeniería civil. Parte 5: Marco de principios específicos y requisitos para las obras de ingeniería civil.

Analizando el procedimiento de ACV establecido, así como el modelo de cálculo necesario para la obtención de resultados, se concluye que es un proceso largo, complejo y ligado a un estudio exhaustivo del sistema a analizar. En concreto, la normativa UNE-EN ISO 14040 establece las 4 etapas representadas en la figura 1.

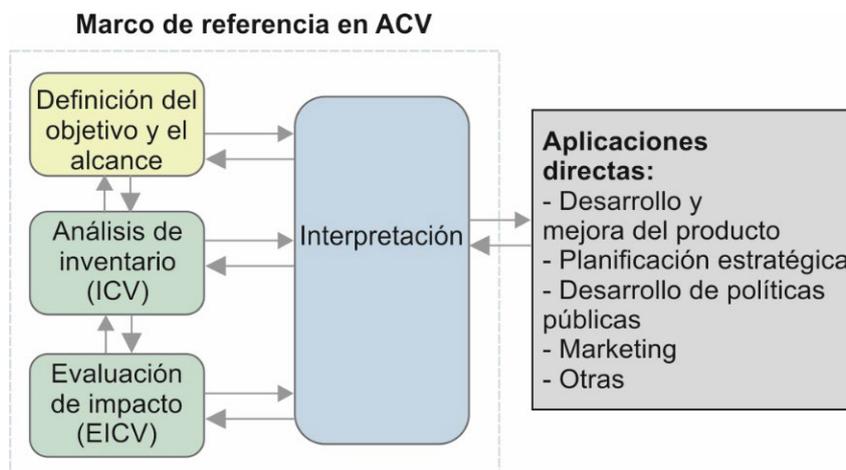


Figura 1. Marco de referencia de un ACV (AENOR, 2006b)

En la primera fase, se define el alcance del estudio, los objetivos, la unidad de referencia (o unidad funcional) incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, el cual depende del tema y del uso previsto del estudio. En la segunda fase de análisis del inventario del ciclo de

vida (fase ICV) se realiza un inventario de los datos de entrada y salida en relación con el sistema bajo estudio. Este inventario será utilizado en la tercera fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (fase EICV) cuyo objetivo es proporcionar información para evaluar los resultados del ICV de un sistema a fin de comprender mejor su importancia ambiental. Por último, la interpretación del ciclo de vida permite resumir y discutir los resultados del ICV y del EICV para establecer conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. Este procedimiento en cuatro fases interrelacionadas es complejo y presenta algunas desventajas en su aplicación a carreteras, debido a la naturaleza multidisciplinar de las etapas y procesos unitarios que componen el ciclo de vida a analizar. En concreto: el establecimiento de la carretera como “sistema-producto”; definición de los límites del sistema; el gran volumen de datos de inventario incluidos en el CV de una carretera; y por último, un modelo de ACV del ciclo de vida desagrega cada etapa del sistema en un conjunto de procesos donde cuantificar entradas y salidas, para lo cual es indispensable que el técnico conozca en profundidad el sistema analizado, sus funciones y tenga competencias en la subdivisión del mismo en un conjunto de procesos unitarios (ver figura 2).

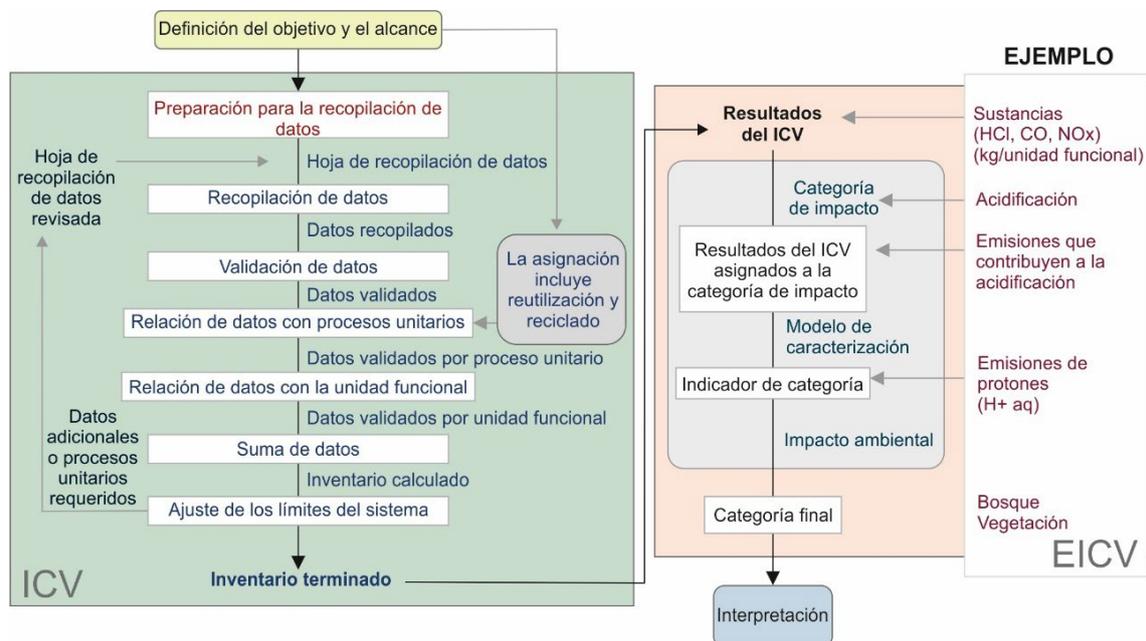


Figura 2. Procedimientos simplificado para el análisis del inventario y concepto de cálculo de indicador de categoría de impacto en EICV (AENOR, 2006a)

Las características del proceso se convierten en dificultades para sectores cuya experiencia en ACV es temprana. Por ello, en la actualidad existen herramientas desarrolladas desde los años 90 que facilitan el proceso. Hay que indicar que por la necesidad de disponer de herramientas comerciales y el interés de la industria en su utilización, el mercado de software profesional aplicable a ACV se ha desarrollado en gran medida en la última década y existen diversas herramientas disponibles. Estas herramientas se adecúan a cualquier objetivo de análisis y usuario (investigadores, consultores, diseñadores o gestores de proyectos sostenibles) y pueden soportar análisis de sistemas de cualquier sector, aplicación (producto, proceso o servicio) y alcance (evaluación de impacto ambiental, contabilidad de la gestión ambiental, análisis de flujos de sustancias y materiales, gestión del ciclo de vida, divulgación de información a público objetivo, certificación y ecoetiquetado, entre otros). Algunas de las más importantes son SIMAPRO, GaBI, Umberto, Air e LCA, Open LCA, one-click LCA, REGIS, eBlance o EIME. El rango de inversión por licencia, dependiendo la temporalidad (anual-indefinida), el tipo de software y la completitud de las bases de datos es de [300 – 15 000]€. También existen softwares libres, cuyo coste solo está ligado a la adquisición de la base de

datos correspondiente, por ejemplo, comparación, open LCA es una herramienta de código abierto (gratuito) que permite la integración de bases de datos tanto libres como privadas. Esta solución es atractiva para cualquier organización que se inicie en ACV.

Aunque en la actualidad es indispensable disponer de una herramienta para llevar a cabo un ACV, el **motor principal del modelo de cálculo** es la base de datos de inventario, ya que su calidad y completitud permitirá obtener resultados de impacto representativos. Por ello, durante los últimos 20 años, se han desarrollado diferentes bases de datos que están integradas en todas las herramientas profesionales actuales; algunas, como es el caso de GaBi, One click LCA u Open LCA han desarrollado bases de datos propias. Analizando las bases de datos disponibles, es posible encontrar dos grupos principales: (1) Genéricas (desarrolladas principalmente en el ámbito académico y por empresas especializadas, como Ecoinvent, GaBi, SOCE o ELCD) y (2) especializadas en un sector, producto o actividad, como por ejemplo Agri-footprint o Social Hotspots, cuyo desarrollo viene determinado e incentivado por las propias normativas mencionadas, que establecen la necesidad de disponer de bases de datos adaptadas a cada práctica económica. La tabla 1 muestra un análisis comparativo de las bases de datos de código abierto y privadas más representativas utilizadas en la actualidad.

Tabla 1. Análisis de bases de datos de código abierto más representativas

LIBRES	Características principales	PRIVADAS	Características principales
Environmental Footprints (EF)	Impactos ambientales de productos y al análisis de huella ambiental en organizaciones.	Ecoinvent ¹ UVEK LCI data ² SOCA ³	¹ Líder en ICV para la industria. ² Basada en Ecoinvent v2.2 actualiza áreas energéticas ³ Extensión Ecoinvent. Impactos sociales de productos.
IMPACT World+	Impacto ambiental y análisis de incertidumbre por variabilidad espacial-geográfica.	LCA Commons	Producción agrícola.
OZLCI2019 (evah institute)	Suministro regional de Australasia.	Agri-footprint	Datos de productos agrícolas (piensos, alimentos y biomasa).
Exiobase	Multirregional; datos input/output. Consumo final de productos.	Eugeos'15804-IA	Complemento de Ecoinvent (EN 15804 para EPD compatibles con ISO14025).
Arvi	Producción de compuestos de madera y polímero.	PSILCA Social Hotspots	Sectores industriales y productos básicos; impactos sociales ACV social y derechos humanos.
Agribalyse	Sector agrícola y alimentario.	ESU world food	Sector alimentario mundial.
Needs	Suministro eléctrico futuro en Europa. Servicios de transporte, suministro de electricidad y materiales.	ProBas Okobaudat	Materiales de construcción
ELCD (European reference Life Cycle Database)	Inventario de líderes (industrias química, metalúrgica, energía, transporte y fin de vida).	IBO	Construcción y edificios
Bioenergdat	Cadenas de suministro de bioenergía alemanas.	SYNERGIA	Huella de carbono

La base de datos más reconocida por la calidad y completitud de datos es Ecoinvent; aunque no está expresamente especializada en carreteras, sí dispone de módulos y conjuntos de datos útiles para este ámbito de actuación y su análisis con ACV. Existen además algunas bases de datos especializadas en el sector de la construcción e infraestructuras civiles

(identificadas en gris en la tabla. Para el caso de las licencias de código cerrado, el rango de inversión por es de [200 – 15000]€.

Una de las propiedades que refleja la calidad de la herramienta y que garantizará correctos resultados en el proceso de ICV y cálculo de impacto es la disponibilidad de bases de datos genéricas y específicas. Por ello, las herramientas profesionales de alto alcance suelen combinar diferentes bases de datos. Es interesante destacar aquellas que han desarrollado bases de datos propias (como GaBi u Open LCA); también, las que tienen bases de datos abiertas colaborativas, como ONE CLICK LCA que integra datos de la mayoría de plataformas EPD (declaraciones ambientales de producto) y dispone de datos específicos de fabricantes.

Todas las herramientas de alto alcance y las bases de datos integradas permiten realizar análisis exhaustivos de cualquier sistema y obtener resultados de cálculo altamente precisos. Pero, por el contrario, implican una alta inversión en coste y tiempo. Además, requieren de un experto en ACV y en el propio sistema a evaluar para la realización de inventario y modelos de análisis.

Por último, y en concreto para el sector de la construcción, la falta de bases de datos especializadas reduce la calidad de los resultados. En la última década, para evitar y solventar estos inconvenientes desde la comunidad científica, algunas administraciones públicas (como Holanda y Francia) y privadas relacionadas con el área de la construcción e infraestructuras de transporte, han desarrollado marcos de trabajo y herramientas de ACV especializadas en el sector. Su objetivo principal es reducir la complejidad del planteamiento del estudio y sustituir el uso de un software profesional por herramientas más sencillas y al alcance económico y técnico de usuarios no expertos en ACV. Para conseguirlo, se basan en la simplificación de métodos de análisis, del proceso de inventario o en la especialización de información de la base de datos.

3. Resultados y discusión

El desarrollo de métodos adaptados de ACV y herramientas especializadas en carreteras es una línea de investigación y desarrollo en fase temprana y en la mayoría de los casos este tipo de herramientas no son comerciales. Analizadas más de 200 publicaciones relativas a la aplicación de ACV en el diseño, construcción y explotación del ciclo de vida de una carretera, solo el 13% de publicaciones tienen el objetivo de desarrollar nuevos métodos (figura 3, sector 1), teniendo el resto trabajos el objetivo de aplicar ACV en diferentes casos de estudio. La figura 3 muestra la distribución del esfuerzo de investigación hasta 2020. Dentro de este porcentaje, solo algunas publicaciones minoritarias llegan a desarrollar herramientas especializadas en el ciclo de vida completo de carreteras. Con la misma tendencia, una

búsqueda de herramientas comerciales permite comprobar **que no hay herramientas disponibles en el mercado.**

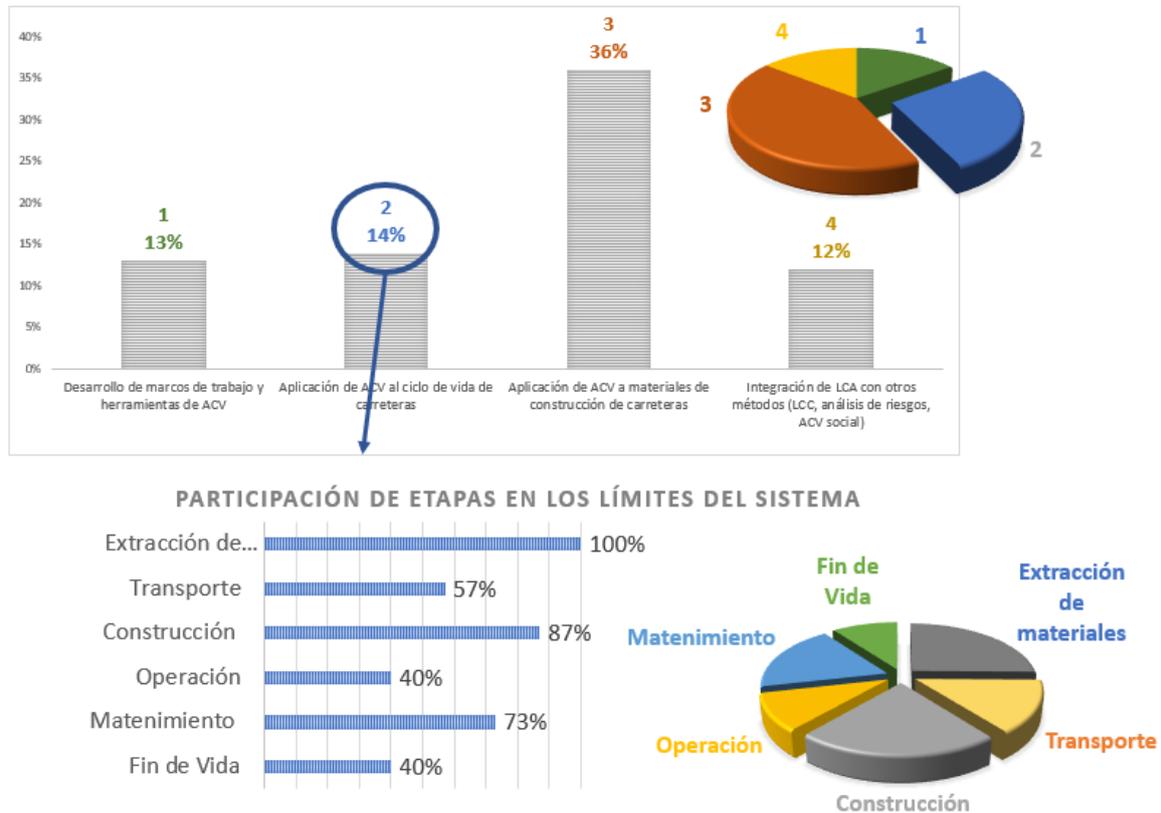


Figura 3. Definición de límites del sistema en estudios publicados

Realizada la clasificación de herramientas comerciales y científicas especializadas, la mayoría han sido desarrolladas en ámbitos académicos y centros de investigación y actualmente no tienen una aplicación comercial, lo que supone la principal desventaja para su utilización en consultoría. Además, y aunque la mayoría son de código abierto, sencillas de utilizar y disponen de una interfaz de usuario intuitiva, presentan un alcance reducido en la definición de los límites del sistema. Como muestra la tabla 2, por lo general suelen excluir etapas del ciclo de vida o reducir las categorías de impacto analizadas, siendo las más desarrolladas hasta la actualidad las destinadas al análisis de la huella de carbono, cambio climático y gestión de GEI en carreteras. El coste de estas herramientas es bajo, con un rango de [40 – 200 €]. Muchas de ellas no están accesibles al ser resultados de proyectos de investigación publicados en fuentes científicas.

Analizando la tabla 2, se puede identificar que uno de los retos a los que se enfrenta la comunidad científica y profesional en el desarrollo de nuevos métodos y herramientas de ACV especializadas está ligado a la primera y segunda etapa de ACV (ISO 14040). En concreto, la fase 2 de ICV, requiere la recopilación exhaustiva de datos ligada a una inversión de tiempo y coste elevados, ocasionando en muchas ocasiones que las herramientas reduzcan el alcance de los límites del sistema. Esta situación puede corroborarse analizando las herramientas de análisis de huella de carbono para carreteras (actualmente las más desarrolladas) (Alzard et al., 2019), que aun habiendo reducido el alcance a una sola categoría

de impacto (cambio climático) la mayoría no incluyen el ciclo de vida completo de una carretera. Del conjunto de herramientas analizadas en detalle en este estudio, el 56% incluyen la fase de preconstrucción (diseño, campaña geotécnica, demoliciones y trabajos previos); el 67 % incluyen la fase de construcción (saneamiento, abastecimiento, drenaje, telecomunicaciones, instalaciones eléctricas, paisajismo, transporte, etc.), el 22% incluyen la operación o vida útil de la carretera (tráfico, alumbrado, drenaje, riego, mantenimiento, etc.), y el 20% a la rehabilitación. Ninguna incluye la fase de fin de vida de la carretera.

Tabla 2. Análisis comparativo de herramientas especializadas en ACV de carreteras

HERRAMIENTA	DESARROLLADOR PUBLICACIÓN	/ DESVENTAJAS
Greenroads	Greenroads Foundation, organización sin ánimo de lucro (EEUU)	Impactos ponderados (ponderación 14040). La obtención de la certificación depende de Greenroads®
VTTI/UC asphalt pavement LCA model	University of Coimbra; Universidad de Portugal; Virginia Tech Transportation Institute (Santos et al., 2015)	Pavimento. Origen de datos EEUU
DuboCalc (Duurzaam Bouwen Calculator)	NRA Rijkswaterstaat (Holanda – National Road Authority)	Idioma: holandés.
ECORCE-M (ECO-comparison Road Construction and Maintenance)	IFSTTAR (Réseau Scientifique et Technique) CEREMA (Ministerio francés de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía - MEDDE)	Idioma: francés Datos de LCI recopilados de la literatura científica (desconocimiento del origen de los datos)
CMS RIPT (carbon management system)	(Fox et al., 2011)	Huella de carbono y análisis de emisiones GEI.
PE-2	Michigan Technological University, Michigan Department of Transportation (MDOT) (Mukherjee & Cass, 2014)	Huella de carbono y análisis de emisiones GEI.
CFET (carbon footprint estimation tool)	University of Maryland (Melanta et al., 2013)	Huella de carbono y análisis de emisiones GEI
ROAD-RES	Universidad Técnica de Dinamarca (Birgisdóttir et al., 2006)	Huella de carbono y análisis de emisiones GEI
CO2NSTRUCT	Facultad de Biología, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Europea de Madrid (Barandica et al., 2013)	Huella de carbono y análisis de energético de materiales de construcción
RoadCO 2	United Arab Emirates University University of Southern Queensland Infrastructure Support Department, Abu Dhabi (Alzard et al., 2019)	Huella de carbono y análisis de emisiones GEI.
ATHENA - Impact Estimator for Highways	Sustainable Materials Institute (Ottawa, Canadá)	Base de datos américa del norte (Canadá)

4 Conclusiones

En la actualidad, el análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología ampliamente utilizada para evaluar el impacto ambiental, económico y social de cualquier producto, proceso y servicio en su ciclo de vida (AENOR, 2006b). La normativa permite una aplicación estructurada del procedimiento en cualquier sector, aunque la tendencia actual es la adaptación de estos estándares a diferentes actividades económicas, es decir, se fomenta el desarrollo de normativa específica para adecuar los modelos de cálculos de impactos a cada sistema-producto y facilitar la aplicación de la metodología. Analizando el procedimiento de ACV establecido, así como el modelo de cálculo necesario para la obtención de resultados, se concluye que es un proceso largo, complejo y ligado a un estudio exhaustivo del sistema a analizar. Las características del proceso se convierten en dificultades para sectores cuya experiencia en ACV es temprana.

Es el caso de su aplicación en el ciclo de vida de carretera. La naturaleza multidisciplinar de las etapas y procesos unitarios que lo componen, el extenso inventario de materias primas y productos procedentes de variedad de fabricantes y proveedores, la escasez de métodos y herramientas específicas que faciliten su aplicación y la inversión de tiempo y recursos económicos necesaria para llevarlos (con herramientas de largo alcance), hace que un Análisis de Ciclo de Vida sea un desafío importante en la actualidad aplicado a carreteras. Además, la calidad de los estudios de ACV se ve comprometida por el reducido número de bases de datos especializadas, la temporalidad, el origen geográfico (regional / local) y la exactitud de los datos del inventario, influyendo en la precisión y validez de los estudios.

Por último, el propio procedimiento de ACV hace que las herramientas disponibles no sean flexibles y su aplicación se lleve a cabo en las últimas fases del proyecto de construcción de carreteras.

Esta misma circunstancia también se da cuando se aplica ACV en casos de estudio reales. Analizando las publicaciones científicas y estableciendo conclusiones sobre los límites del sistema definidos en estos estudios (sectores 2 y 3 de la figura 4), todas las publicaciones tienen en cuenta la etapa de extracción de material; además, un 72 % estudia exclusivamente esta fase del ciclo de vida y solo un 28 % considera el ciclo de vida completo de la carretera. Por otro lado, y analizando estas últimas (figura 4, sector 2) la definición de los límites del sistema varía dependiendo de la disponibilidad de los datos, siendo las fases de mantenimiento y fin de vida las menos consideradas.

5 Referencias

- AENOR. (2006a). ISO 14044: Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. International Organization of Standardization.
- AENOR. (2006b). UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia (p. 30).
- Alzard, M. H., Maraqa, M. A., Chowdhury, R., Sherif, M., Mauga, T. I., De Albuquerque, F. B., & Aljunadi, K. N. (2019, May 14). RoadCO2: A web-based tool for estimation of greenhouse gas emissions of road projects. 2019 Advances in Science and Engineering

Technology International Conferences, ASET 2019.
<https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714341>

- 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>
- Bekker, P. C. F. (1982). A life-cycle approach in building. *Building and Environment*, 17(1), 55–61. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(82)90009-9)
- Birgisdóttir, H. (2005). Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration [Institute of Environment & Resources. Technical University of Denmark]. http://orbit.dtu.dk/files/130476158/MR2005_106.pdf
- Birgisdóttir, H., Pihl, K. A., Bhandar, G., Hauschild, M. Z., & Christensen, T. H. (2006). Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(5), 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.001>
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., & Jensen, A. (1993). Guidelines for life-cycle assessment: a Code of Practice (1st ed. Pe).
- Fox, J., Bell, D., Edmond, G., Cummings, P., & Langstraat, J. (2011). A practical tool for low-carbon road design and construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 164(3), 165–179. <https://doi.org/10.1680/tran.2011.164.3.165>
- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., Bruijn, H. de, Duin, R. van, & Huijbregts, M. A. J. (2002). Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. In *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- Horvath, A. S., Pacca, E., Masanet, & Canapa, R. (2007). Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects. Consortium on Green Design and Manufacturing, University of California. Berkeley.
- Lasvaux, S., Habert, G., Peuportier, B., & Chevalier, J. (2015). Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(11), 1473–1490. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0938-z>
- Melanta, S., Miller-Hooks, E., & Avetisyan, H. G. (2013). Carbon Footprint Estimation Tool for Transportation Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(5), 547–555. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000598](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000598)
- Mukherjee, A., & Cass, D. (2014). PE-2. Project Emission Estimator. Highway Construction GHG Calculator. https://www.construction.mtu.edu/cass_reports/webpage/index.html
- Poulidakos, L. D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone Falchetto, A., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., & Partl, M. N. (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road

construction. In Resources, Conservation and Recycling (Vol. 116, pp. 32–44). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>

Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2015). A life cycle assessment model for pavement management: Methodology and computational framework. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(3), 268–286. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.942861>

SETAC. (2003). *Life-Cycle Assessment in Building and Construction: A State-of-the-Art Report - Society of Environmental Toxicology and Chemistry*.

Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. T. (2009). Quantification of Carbon Footprint on Underground Utility Projects. *Construction Research Congress 2009*, 618–627. [https://doi.org/10.1061/41020\(339\)63](https://doi.org/10.1061/41020(339)63)

Takano, A., Winter, S., Hughes, M., & Linkosalmi, L. (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.025>

Yang, R., & Al-Qadi, I. L. (2017). Development of a Life-Cycle Assessment Tool to Quantify the Environmental Impacts of Airport Pavement Construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2603(1), 89–97. <https://doi.org/10.3141/2603-09>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

