

02-022

TOOL DESIGN FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE RESIDENTIAL BUILDING STOCK IN COLOMBIA

Jorge Ortiz, Andrea ⁽¹⁾; Braulio-Gonzalo, Marta ⁽¹⁾; Bovea, María D. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat Jaume I

The building sector have a major environmental impact throughout their life cycle and it is expected to increase progressively in the coming years. The evaluation of this environmental impact is necessary both to identify the most contributing stages and to select those more sustainable alternatives. To do this, the application of LCA methodology is a key issue. At a global level, different LCA tools have been developed linked to the building sector, however, their application to Latin American countries is not always possible due to the construction particularities of the building stock and the lack of inventory data applicable to the geographic and the socio-economic context. The objective of this study is to design a LCA tool adapted to the specific context of the building sector in Colombia, which allows calculating the environmental impact of residential buildings in an intuitive way for the user. To do so, firstly, a scientific background review of the existing LCA tools for buildings at an international level and then, the requirements that the tool to be designed must have were identified and established. Finally, the structure and the main functionalities of the LCA tool for buildings in the context of Colombia were presented.

Keywords: residential buildings; sustainability; Life Cycle Analysis; building typology; construction assemblies

DISEÑO DE HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PARQUE EDIFICATORIO RESIDENCIAL EN COLOMBIA

El sector de la edificación genera alto impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida y se prevé que este aumente en los próximos años. La cuantificación de este impacto ambiental resulta necesaria tanto para identificar las etapas más contaminantes, como para seleccionar aquellas alternativas más sostenibles y, para ello, es clave la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). A nivel mundial se han desarrollado diferentes herramientas de ACV vinculadas con el sector de la edificación, sin embargo, su aplicación a países latinoamericanos no siempre es posible debido a las particularidades constructivas del parque edificatorio y la disponibilidad de datos de inventario aplicables al contexto geográfico socioeconómico. El objetivo principal de este estudio es diseñar una herramienta de ACV adaptada al contexto específico de la edificación en Colombia, que permita calcular el impacto ambiental de los edificios residenciales de forma intuitiva. Para ello, se realiza en primer lugar una revisión bibliográfica de las herramientas existentes de ACV de edificios a nivel internacional y, seguidamente, se establecen los requerimientos que debe tener la herramienta a diseñar. Finalmente, se presenta la estructura y las principales funcionalidades de la herramienta diseñada para el contexto de Colombia.

Palabras clave: edificios residenciales; sostenibilidad; análisis de ciclo de vida; tipología edificatoria; soluciones constructivas

Agradecimientos: Las autoras agradecen a la Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital (Comunitat Valenciana, Spain) (Proyecto CIGE/2021/054) la financiación recibida para realizar este estudio.



© 2023 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

El sector de la edificación alrededor del mundo contribuye en gran medida al impacto ambiental. En la Unión Europea (UE) los edificios consumen el 42% de energía y generan el 35% de los gases de efecto invernadero (GEI) (COM445, 2014), en Estados Unidos emiten aproximadamente el 39% (Amini Toosi et al., 2020) y, de acuerdo con estadísticas en Colombia, las edificaciones en el país son responsables del 35% de las emisiones de GEI, y se estima que este porcentaje aumenta a una tasa anual equivalente de 1,8% (IDEAM et al., 2022).

Estos incrementos son debido al crecimiento demográfico y al desplazamiento de la población a las ciudades. Según estimaciones, para el año 2050 el 70% de la población mundial vivirá en las principales ciudades, razón por la cual se han establecido objetivos de reducción de GEI del 55% para el año 2030 (COM562, 2020) en la UE. En Colombia se ha propuesto el proyecto acelerador Edificaciones Neto Cero Carbono (AECC) (CCCS & Universidad de Los Andes 2022). Entre la comunidad científica existe el consenso de que para evaluar la eficiencia de estas estrategias, la principal herramienta utilizada es el análisis de ciclo de vida (ACV) (ISO 14040, 2006).

A nivel mundial se han desarrollado diferentes herramientas para realizar estudios de ACV vinculados con el sector de la edificación. La mayoría se basan en la norma EN 15804 (2013), cuyo ámbito de aplicación son los productos de construcción, y en la norma EN 15978 (2011), que establece específicamente el método para evaluar el comportamiento ambiental de los edificios, ambas siguiendo la metodología de ACV propuesta por la ISO 14040 (2006). Zamagni et al. (2008) estima que existen 42 herramientas a nivel mundial que evalúan el análisis de ciclo de vida, siendo las más utilizadas Simapro (Prè Consultants, 2016) y Gabi (Sphera, 2021) a nivel genérico, y Athena (Athena Sustainable Materials Institute, 2022) específica de edificios (Jorge-Ortiz, Braulio-Gonzalo, & Bovea, 2022a). Sin embargo, en general las herramientas presentan limitaciones, entre las cuales destaca que las bases de datos de inventario incluidas no son aplicables de forma directa a cualquier región del mundo, con lo que los resultados no se ajustan a la realidad del contexto geográfico y socioeconómico.

El objetivo principal de este estudio es diseñar una herramienta de ACV adaptada al contexto específico de la edificación en Colombia, y que permita calcular el impacto ambiental de los edificios residenciales de forma intuitiva. Para ello, se realiza en primer lugar una revisión bibliográfica de las herramientas existentes de ACV de edificios a nivel internacional y, seguidamente, se establecen los requerimientos que debe tener la herramienta a diseñar. Finalmente, se presenta la estructura y las principales funcionalidades de la herramienta diseñada.

2. Estado del arte

Previo a la definición de los requisitos de la herramienta a diseñar, es necesario conocer la estructura y funcionalidades de las herramientas existentes. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica, con el fin de analizar los requerimientos y el alcance que analizan las herramientas de análisis de ciclo de vida en diferentes países alrededor del mundo y en un periodo relativamente reciente (desde 2014 hasta la actualidad) en Google Scholar y Scopus.

La Tabla 1 presenta los requerimientos básicos que se deben tener en cuenta al diseñar una herramienta de ACV en edificios y, como se puede observar, la localización, la geometría y los tipos de materiales, son los requerimientos mínimos por incluir. Además de estos, Meex et al. (2018) sugieren que el tener una base de datos de inventario adaptada al contexto del país es clave para realizar una adecuada evaluación, así como que los métodos de cálculo

sean sencillos, que la interfaz sea amigable y que el tiempo invertido al ejecutar un análisis sea el menor posible.

Tabla 1: Revisión de requerimientos para las herramientas de ACV

Referencia	País	Requerimientos
(Meex et al., 2018)	Alemania	Localización, geometría del edificio, materiales (tipos y procesos), base de datos local, método y categorías de impacto ambiental, alcance, elementos de construcción
(Cang et al., 2020)	China	Geometría edificio, materiales, elementos constructivos
(Zhou, Tam, & Le, 2023)	Australia	Geometría edificio, materiales, elementos constructivos, base de datos de materiales, tipo de edificio
(Cavalliere et al., 2018)	Italia	Dimensiones del edificio consumo energético, transporte, materiales, vida útil, tipo de edificio

Asimismo, la Tabla 2 analiza estudios donde se desarrollan herramientas de ACV de edificios, y las clasifica según el país de origen, el tipo de edificio evaluado, los requerimientos a incluir y el alcance de la evaluación mediante los módulos de información de ACV considerados, según la nomenclatura de EN 15804 (2013).

Tabla 2: Revisión de herramientas de ACV existentes

Referencia	País	Tipo de edificio	Requerimientos	Módulos ACV
(Apostolopoulos et al., 2023)	Grecia	Residencial, multifamiliar	Consumo de energía y zonas climáticas	A1-A3, A4-A5, B1
(Famiglietti et al., 2022)	Italia	Residencial, Escala urbana	Consumo de energía y localización	B6
(Kanafani et al., 2021)	Dinamarca	Todos	Información básica, cantidad de material, tipo de edificio, año de construcción	A1-A3, B4, B6, C3-C4
(Hassan et al., 2022)	Egipto	Residencial	Información básica, zona climática, orientación, área, espesor, tipo de material	A1-A3, B4
(Llatas et al., 2021)	España	Residencial, Escala urbana	Localización, tipo de edificio, compañía de construcción, área total, soluciones constructivas	C1-C4
(Mouton et al., 2022)	Bélgica	Residencial	Soluciones constructivas, tipo de materiales	B1, B3, B5, B7, D
(Kumanayake & Luo, 2018)	Sri Lanka	Todos	Tipo de materiales, actividades de construcción, localización, tipo de edificio, vida útil, soluciones constructivas	A1-A3, A4-A5, B3, B4, B6, C1-C4
(Rodrigues et al., 2018)	Portugal	Residencial	Localización, tipo de edificio, compañía de construcción, área total, soluciones constructivas	A5, B6, B4, C1-C4
(Song, Zhang, & Mo, 2021)	China	Residencial	Datos de energía, zonas climáticas, tipo de materiales	B6
(Hester et al., 2018)	Estados Unidos	Residencial	Soluciones constructivas, tipo de materiales, consumo de energía, geometría, Ocupantes, equipamiento	A1-A5, B4, B6, C1-C4

De la revisión se desprende que la mayoría de las herramientas evalúan cualquier tipo de edificio, principalmente de uso residencial, y en algunos casos evalúan también el impacto de los edificios a escala urbana o a escala de vecindario. Dentro de los requerimientos, con frecuencia se encuentra la zona climática, los elementos constructivos, el consumo de energía, la cantidad y el tipo de materiales que componen cada uno de los elementos

constructivos, la localización, la geometría del edificio y el tipo de edificio. En menor proporción, el transporte, las actividades de construcción, la orientación, el área total, el equipamiento eléctrico y el espesor de los elementos constructivos.

En cuanto al alcance de las herramientas, la mayoría evalúan el impacto de los materiales (A1-A3), seguido por el impacto de la energía consumida dentro de las viviendas (B6) y la etapa de fin de vida (C1-C4). En menor medida, se evalúan los impactos generados en la construcción (A4-A5) y en los escenarios de reparación, sustitución y rehabilitación (B3-B5). Ninguno contempla escenarios de mantenimiento (B2), ni otros aspectos derivados del impacto que tiene el estilo de vida de los ocupantes durante la etapa de uso.

En el contexto de Colombia, aunque se han realizado algunos análisis de ciclo de vida de edificios (González, Pérez, & Galeano, 2019; Ortiz-Rodríguez, Castells, & Sonnemann, 2010), en la actualidad no existe una herramienta propia adaptada al contexto del país. Además, estos estudios emplean bases de datos genéricas, como Ecoinvent (2020) y software como SimaPro (Prè Consultants, 2016), por lo que no incluyen información de inventario específica del contexto de la región.

3. Requisitos de la herramienta

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se desprenden los requerimientos que debe cumplir la herramienta, los cuales son:

- Que se desarrolle conforme a la metodología de la norma EN 15978 (2011), como lo sugiere Llatas et al. (2021).
- Que su alcance incluya todo el ciclo de vida del edificio, incluyendo los módulos A1-C4.
- Que tenga una interfaz amigable, intuitiva, sin necesidad de cálculos auxiliares externos, como propone Meex et al. (2018).
- Que permita seleccionar la zona climática y la localización geográfica, como lo realizan en su estudio Hassan et al. (2022) y Apostolopoulos et al. (2023).
- Que permita elegir el tipo de edificio y el año de construcción.
- Que permita definir la geometría del edificio mediante la superficie de cada elemento constructivo.
- Que sugiera un conjunto de soluciones constructivas para el edificio según su año de construcción y su tipología, como sugiere Llatas et al. (2021).
- Que el usuario pueda cargar los datos propios del edificio y que, en caso de no contar con ellos, exista la opción de cargar los valores por defecto, como proponen Meex et al. (2018) en su estudio.
- Que disponga de una base de datos de materiales de construcción adaptada a la región de estudio y que sea actualizable y/o ampliable con nuevos materiales.
- Que la base de datos incluya factores de emisión para cada material de construcción y para las siguientes categorías de impacto: calentamiento global (GWP), agotamiento de

la capa de ozono (ODP), acidificación (AP), eutrofización (EP), agotamiento abiótico (elementos) (ADPE) y agotamiento abiótico (combustibles fósiles) (ADFP).

- Que considere el comportamiento de los ocupantes durante la etapa de uso del edificio, como su consumo de energía, de agua, generación de residuos, etc.
- Que los resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida puedan obtenerse de forma gráfica y en tablas de datos.

4. Diseño de la herramienta

4.1 Etapas del ciclo de vida consideradas

El diseño de la herramienta se ha planteado de acuerdo a la estructura de la norma EN 15978 (2011), teniendo en cuenta los siguientes niveles de análisis y criterios:

- **Definición de los objetivos y el alcance de la evaluación:**
 - Objetivo: analizar el ciclo de vida de los edificios residenciales que componen el parque edificatorio del piso frío y templado en Colombia.
 - Periodo de referencia: el usuario puede elegir los años de vida útil del edificio a evaluar, entre los 50 y 100 años.
 - Alcance: los límites del sistema se han definido de acuerdo con la norma EN 15804 (2013) siguiendo el principio de modularidad, de manera que los impactos se asignan a cada uno de los módulos de información de ACV incluidos en las diferentes etapas del edificio. Asimismo, se han incluido dos nuevos módulos propuestos en el proyecto EeBGuide (Effi & Partn, 2012), que consideran la generación de residuos sólidos urbanos (B8) y el transporte de los ocupantes (B9) durante la etapa de uso, ambos derivados del estilo de vida de los ocupantes. El conjunto de módulos se describe a continuación:
 - Producto (A1-A3): suministro de materias primas, transporte y fabricación. De productos de construcción.
 - Construcción (A4-A5): transporte a obra y construcción.
 - Uso (B1): impactos de uso de los componentes del edificio.
 - Uso (B2-B4): mantenimiento, reparación y sustitución.
 - Uso (B5): rehabilitación.
 - Uso (B6-B7): uso de energía y uso de agua.
 - Uso (B8): generación de residuos sólidos urbanos.
 - Uso (B9): transporte de los ocupantes derivado de su actividad.
 - Fin de vida (C1-C4): deconstrucción del edificio, transporte de residuos, reutilización/recuperación/reciclaje de residuos y vertido.
 - Cargas más allá del ciclo de vida (D): beneficios y cargas fuera del sistema (no incluido).

Inventario. Para configurar el modelo de inventario se utilizaron las siguientes fuentes: Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de los materiales de construcción propios de Colombia. Como hasta la fecha existen pocas DAP del país, se completó el modelo con DAP

de países cercanos, como México o Brasil. Ecoinvent (2020), como base de datos para los materiales que no disponían de DAP.

Evaluación del Impacto: para la evaluación de impacto ambiental se utilizó el método CML (Leiden University, 2016). Se consideran las categorías de impacto GWP, ODP, AP, EP, ADPE, ADFP.

4.2 Estructura de la herramienta

Se ha desarrollado la herramienta de ACV con el programa Microsoft Excel (Microsoft, 2021), mediante la utilización de macros para el funcionamiento dinámico y eficaz de la interfaz. Su estructura cuenta con los cinco bloques mostrados en la Figura 1 y que se describen a continuación.

1. **Menú principal.** El menú principal está compuesto por los diferentes bloques que conforman la herramienta y el usuario puede navegar por éstos mediante diferentes botones que se activan conforme se introducen los datos de entrada. El menú principal se muestra siempre fijo a la izquierda y la sección de datos generales, dentro del menú, siempre está fija y visible.
2. **Datos generales.** La Figura 1 muestra el bloque de datos generales junto con sus respectivos botones. Este bloque está dividido en cuatro secciones. La primera sección se denomina Localización y en ella el usuario puede seleccionar la zona climática según el departamento y municipio de Colombia. Hasta el momento, la herramienta carga datos climáticos y demográficos para los pisos frío y templado del país. En esta misma sección se introducen los datos propios de la vivienda, como son el año de construcción, el tipo de urbanización y de edificio, la adyacencia y el número de plantas. A partir de estos datos, automáticamente, la herramienta carga un código para el edificio. Los códigos de edificación, las tipologías de edificio y los elementos constructivos provienen de un trabajo previo propuesto por Jorge-Ortiz, Braulio-Gonzalo y Bovea, (2022b), en la cual se describe la tipología típica de las viviendas en Colombia y se realiza un inventario de los materiales que componen cada una de las soluciones constructivas.

En la segunda sección, el usuario ingresa los datos dimensionales del edificio objeto de estudio, la vida útil del edificio, el número de ocupantes. En la tercera sección se determina el alcance del estudio, es decir, se seleccionan los módulos de información de ACV y, dependiendo de dicha selección, se activan los botones correspondientes (A1-A3, A4-A5, B1, B2-B4, B5, B6-B9 y C1-C4).

Finalmente, en la cuarta sección el usuario elige los elementos constructivos correspondientes a: fachada, cubierta, cimentación, estructura vertical, estructura horizontal, suelos, tabiques internos y ventanas, cuyas soluciones están condicionadas por el código de edificación. Automáticamente, se activan los botones y se muestra una breve descripción de cada elemento. La selección de estos elementos es condicionante en los módulos A1-A3, B2-B5 y C1-C4, como se muestra en la Figura 1. Al ofrecer estos conjuntos de elementos constructivos preconfigurados, la herramienta facilita al usuario la introducción de datos de forma amigable.

3. **Base de datos de inventario.** En este bloque se definió primeramente el conjunto de materiales que componen 1 m² de cada tipo de elemento constructivo, con el rendimiento de material extraído de bases de datos de referencia como IVE (2022) y Generador de Precios (CYPE 2022), lo que permite obtener la lista de materiales (*Bill of Materials*, BoM). Para cada material se incluyen los factores de emisión ambientales y, además, el precio, extraído de las bases de datos anteriormente citadas. De la misma manera, se creó la base de datos para las actividades de mantenimiento, reparación, sustitución y

rehabilitación. Las bases de datos de la herramienta quedan ocultas para el usuario, con la posibilidad que el desarrollador pueda actualizarla.

4. **Datos constructivos de instalaciones y uso.** En este bloque el usuario debe ingresar los valores dependiendo de los módulos de información anteriormente seleccionados. En algunos casos, el usuario tiene la opción de cargar valores por defecto, cuyos datos se han tomado de valores nacionales de referencia.
5. **Resultados.** Una vez introducidos todos los datos de entrada, la herramienta realiza los cálculos internamente, dando la facilidad al usuario de visualizar los resultados de dos maneras diferentes: mediante tablas y gráficos de barras. Para los módulos A1-A3 y B2-B5, relativos a los elementos constructivos la herramienta realiza un análisis de ecoeficiencia, incluyendo resultados de impacto ambiental y económico. La herramienta presenta los resultados en formato tabla y gráfica, para todas las etapas del ciclo de vida. La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, los formatos en que pueden obtenerse los resultados.

Figura 1: Estructura de la herramienta

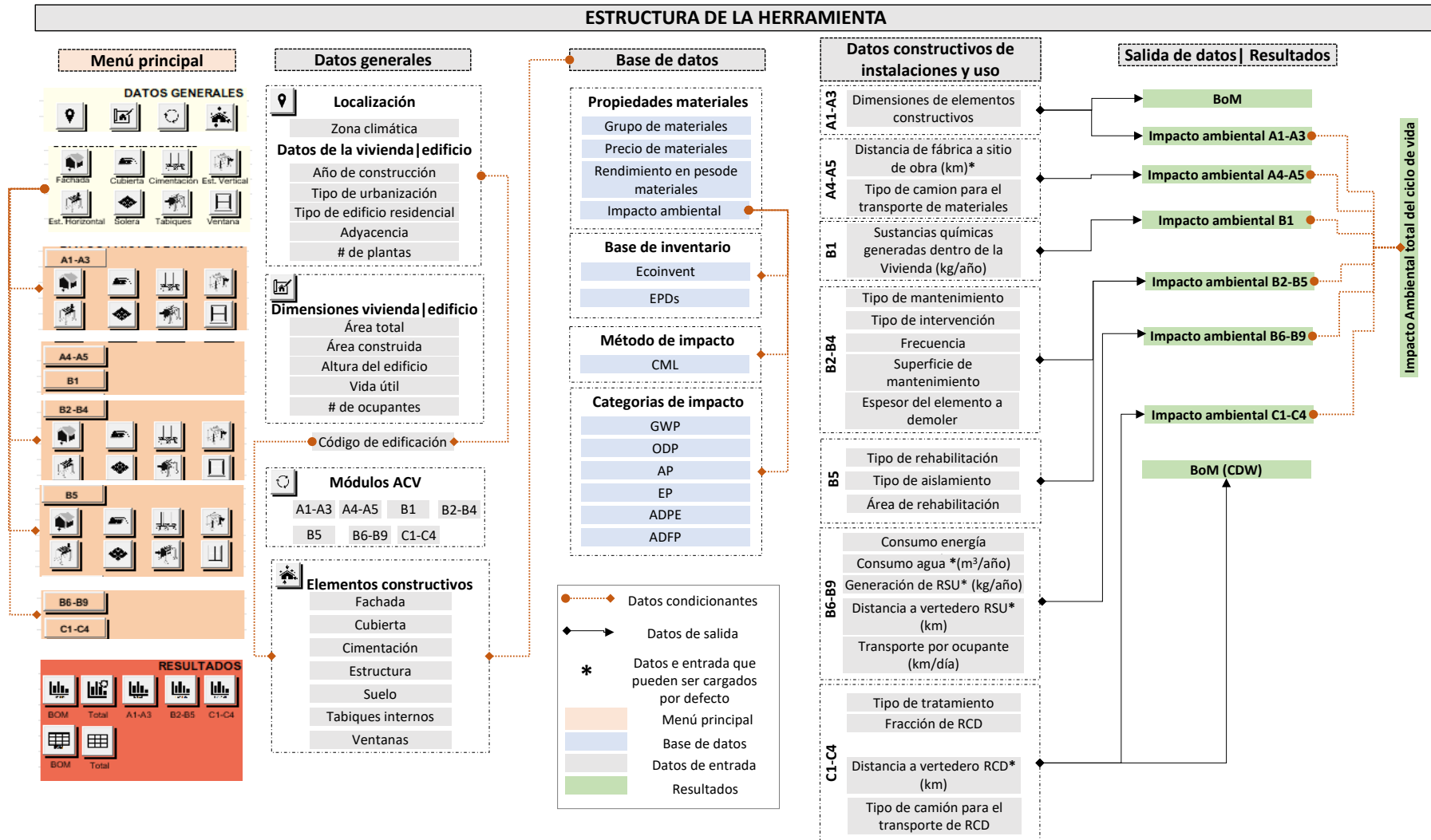
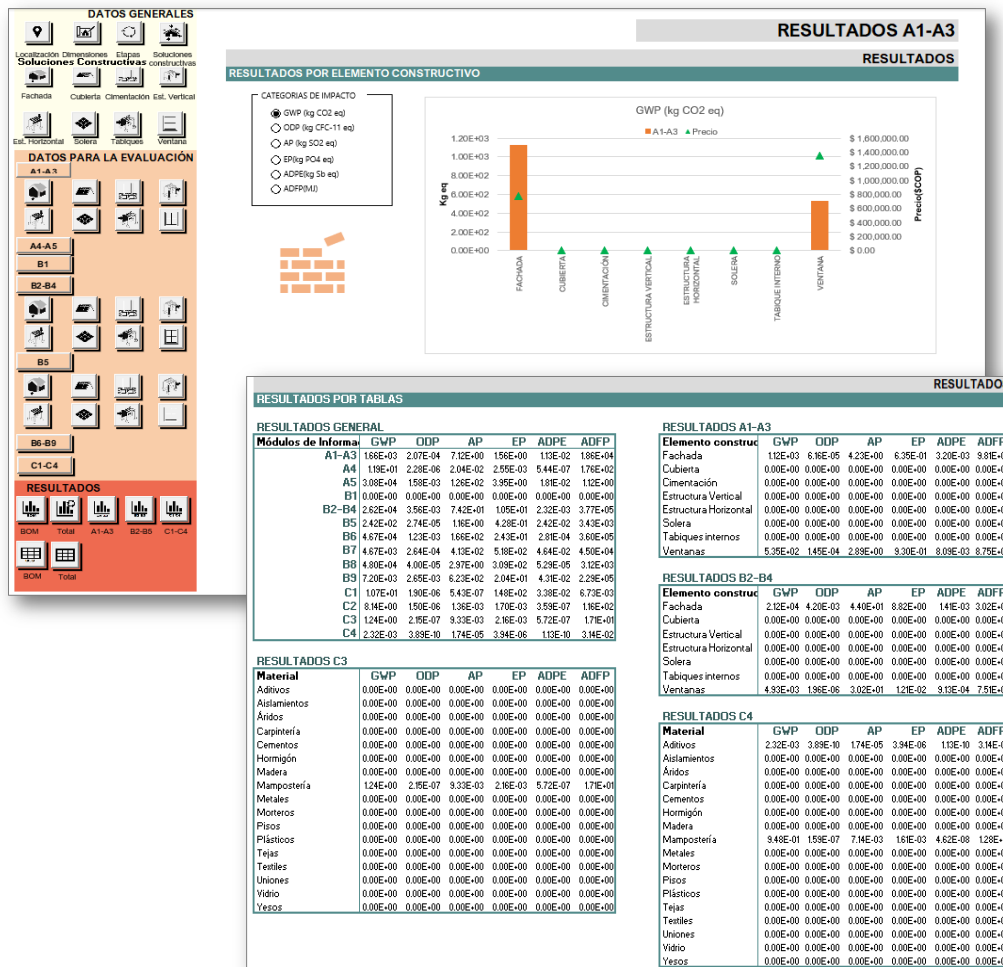


Figura 2: Ejemplo de los formatos de resultados



5. Conclusiones

De la revisión bibliográfica se evidencia que las herramientas de cálculo de ACV de edificios deben tener la capacidad de manejar gran cantidad de datos, no solo geométricos, sino también relativos al entorno y propios del contexto local donde está ubicado el edificio. Además, estas deben contemplar el comportamiento ambiental del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas, hasta la deconstrucción y disposición final.

Este estudio tuvo como objetivo desarrollar una herramienta para la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida del edificio en el contexto del parque edificatorio de Colombia. La herramienta se puede utilizar tanto para el parque edificatorio existente como para las nuevas construcciones. También puede ser útil para la toma temprana de decisiones en las fases de diseño de los nuevos edificios, ya que en ésta no sólo se estima el impacto ambiental generado por los elementos constructivos, sino también criterios como el coste de construcción y el impacto que puede generar el transporte de materiales y productos de construcción en las diferentes etapas del ciclo de vida.

Teniendo en cuenta el ciclo de vida completo de los edificios, la herramienta también incorpora el conjunto de actividades de mantenimiento que se pueden realizar para prolongar la vida útil

durante la etapa de uso, dependiendo de las características del edificio. Asimismo, se sugiere al usuario las posibles actuaciones de rehabilitación que se podrían en el edificio existente.

El diseño de la herramienta cumple con los requisitos básicos enmarcados por diferentes autores, siguiendo la metodología propuesta en la norma EN 15978 (2011). Al desarrollar la herramienta en Excel, se logra crear una plataforma accesible para el público, de fácil funcionamiento y amigable con el usuario.

La principal ventaja del diseño de la herramienta es que al incorporar el inventario de materiales y las tipologías de edificio existente en Colombia, permitiendo así que los futuros estudios arrojen resultados más realistas; por otro lado la principal limitación que se encontró al desarrollar la herramienta fue la recopilación de datos locales debido a la falta de disponibilidad de declaraciones ambientales de producto propios de Colombia, para lo cual se remitió a datos internacionales de referencia.

Como futuros desarrollos, se propone ampliar la base de datos de materiales, de mantenimiento y de rehabilitación, teniendo en cuenta nuevas configuraciones de elementos constructivos que puedan existir en los edificios. Además, también se podría ampliar el alcance a otras zonas climáticas de Colombia.

6. Referencias

- Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., & Aste, N. (2020). Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review. *Sustainable Cities and Society*, 60(May), 102248. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>
- Apostolopoulos, V., Mamounakis, I., Seitaridis, A., Tagkoulis, N., Kourkoumpas, D. S., Iliadis, P., Angelakoglou, K. & Nikolopoulos, N. (2023). An Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing Approach Towards Sustainable Building Renovation Via a Dynamic Online Tool. *Applied Energy*, 334(January), 120710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710>
- Athena Sustainable Materials Institute. (2022). Athena. Recuperado de <http://www.athenasmi.org/our-software-data/lca-databases/>
- Cang, Y., Luo, Z., Yang, L., & Han, B. (2020). A new method for calculating the embodied carbon emissions from buildings in schematic design: Taking “building element” as basic unit. *Building and Environment*, 185(June), 107306. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107306>
- Cavalliere, C., Dell’Osso, G. R., Pierucci, A., & Iannone, F. (2018). Life cycle assessment data structure for building information modelling. *Journal of Cleaner Production*, 199, 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.149>
- COM445. *Comunicación de la Comisión al parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las regiones oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción.* , (2014). Bruselas.
- COM562. *Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the r.* , (2020).
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, & Universidad de Los Andes. (2022). *Línea Base de Emisiones GEI de las Edificaciones en Colombia.*
- CYPE Ingenieros S.A. (2022). Generador de precios de la construcción. Colombia. Recuperado de <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>

- Ecoinvent. (2020). Ecoinvent Database. Recuperado de <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- Effi, E., & Partn, P. (2012). *EeBGuide. Part B:BUILDINGS*.
- EN 15804. *Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products*. , (2013).
- EN 15978. *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. , (2011).
- Famiglietti, J., Toosi, H. A., Dénarié, A., & Motta, M. (2022). Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale: The case of the energy performance of the building sector. *Energy Conversion and Management*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115389>
- González, K., Pérez, L. F., & Galeano, E. (2019). Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia. *Inventum*, 14(27), 3-14. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.3-14>
- Hassan, S. R., Megahed, N. A., Abo Eleinen, O. M., & Hassan, A. M. (2022). Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy and Buildings*, 267, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112144>
- Hester, J., Gregory, J., Ulm, F. J., & Kirchain, R. (2018). Building design-space exploration through quasi-optimization of life cycle impacts and costs. *Building and Environment*, 144(July), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.003>
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, & DNP. (2022). *Informe del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2018 y carbono negro 2010-2018 de Colombia*. Bogotá D.C. Recuperado de www.cambioclimatico.
- ISO 14040. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. , (2006). International Organization for Standardization (ISO).
- IVE. (2022). Base de datos de construcción. Recuperado de <https://bdc.f-ive.es/BDC22/1>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2022a). Análisis de ciclo de vida en el sector de la edificación residencial: estado del arte. *26th International Congress on Project Management and Engineering (Terrassa), CIDIP 2022*, 407-419.
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2022b). Propuesta metodológica para la caracterización del parque edificatorio residencial de la región de los pisos térmicos frío y templado en Colombia. (*En revisión*).
- Kanafani, K., Zimmermann, R. K., Rasmussen, F. N., & Birgisdóttir, H. (2021). Learnings from developing a context-specific LCA tool for buildings—the case of Icabyg 4. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1-23. <https://doi.org/10.3390/su13031508>
- Kumanayake, R., & Luo, H. (2018). A tool for assessing life cycle CO2 emissions of buildings in Sri Lanka. *Building and Environment*, 128(October 2017), 272-286. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.042>
- Leiden University. (2016). CML-IA. Recuperado de <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M. V., & Quiñones, R. (2021). An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. *Waste Management*, 126, 608-622.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.047>

Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L., & Verbeeck, G. (2018). Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, 133(February), 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>

Microsoft. (2021). *Microsoft Excel*. Recuperado de <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel>

Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2022). Development of environmental benchmarks for the Belgian residential building stock. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012077>

Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Science of the Total Environment*, 408(12), 2435-2443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021>

Prè Consultants. (2016). *SimaPro Database 8.3.2*.

Rodrigues, C., Kirchain, R., Freire, F., & Gregory, J. (2018). Streamlined environmental and cost life-cycle approach for building thermal retrofits: A case of residential buildings in South European climates. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2625-2635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.148>

Song, Y., Zhang, H., & Mo, H. (2021). A LCA-based Optimization Method of Green Ecological Building Envelopes: A Case Study in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 696(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/696/1/012023>

Sphera. (2021). GaBi Solutions. Recuperado de <https://gabi.sphera.com/international/databases/>

Zamagni, A., Buttol, P., Porta, P., Buonamici, R., Masoni, P., Guinée, J., Heijungs, R., Ekvall, T., Bersani, R., Bienkowska, A. & Pretato, U. (2008). *Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice* (ENEA, Ed.).

Zhou, Y., Tam, V. W., & Le, K. N. (2023). Sensitivity analysis of design variables in life-cycle environmental impacts of buildings. *Journal of Building Engineering*, 65(August 2022), 105749. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105749>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

