

Análisis comparativo del Ciclo de Vida de edificaciones construidas con Prefabricación Industrializada en latitudes Mediterránea y Tropical

Comparative Analysis of the Life-cycle of Industrialized Prefabricated Buildings in Mediterranean and Tropical Latitudes

DOI: <https://doi.org/10.51378/iuca.v3i3.10352>

Lizeth Rodríguez Rodríguez

PhD Tecnología en arquitectura, construcción y desarrollo urbano
Investigadora y académica
Departamento de Organización del Espacio
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
El Salvador
lrrodriguez@uca.edu.sv
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2890-0433>

Adrián Muros Alcojor

PhD Àmbits de recerca en L'energia
Profesor
Universidad Politécnica de Cataluña
España
adrian.muros@upc.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0167-2904>

Oriol Paris-Viviana

PhD en Tecnología de la Arquitectura
Profesora
Universidad Politécnica de Cataluña
España
oriol.paris-viviana@upc.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2593-980X>

Palabras clave: energía, construcción, estructura, diseño, huella de carbono.

Keywords: energy, construction, structure, design, carbon footprint.

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

Resumen

La presente investigación se enfoca en el estudio y análisis comparativo de edificios construidos con sistemas de prefabricación industrializada, partiendo de la premisa que la industrialización implica optimización de recursos, innovación tecnológica y sostenibilidad ambiental. El análisis se basa en la metodología: Análisis de Ciclo de Vida, (Life Cycle Assessment, LCA) en casos seleccionados, bajo criterios paramétricos, aprovechando el marco regulatorio europeo (mediterráneo) en esta temática, además se aplicará la metodología a edificios de la región centroamericana (tropical), que aún no poseen un marco consolidado para la regulación de estrategias de sostenibilidad ambiental, y que es idónea dado el creciente uso de nuevas tecnologías industrializadas para la edificación

Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

en la región tropical, inmersa en un contexto de amenaza sísmica. Mediante un proceso de análisis y cálculo, se determinan métricas para evaluar los parámetros de sostenibilidad, así como el establecimiento de indicadores para medir la optimización de los sistemas constructivos y el potencial de evitar impactos ambientales desde el proceso de diseño, considerando el desarrollo del edificio a lo largo de la vida útil, hasta su fin de vida. Entre los principales hallazgos se puede afirmar que la prefabricación industrializada contribuye a la sostenibilidad ambiental ya que la recuperación de materiales al fin de vida conlleva una disminución media del 60% de la huella de carbono.

Abstract

This research focuses on the study and comparative analysis of buildings constructed with industrialised prefabrication systems, based on the premise that industrialisation implies optimisation of resources, technological innovation and environmental sustainability. The analysis is based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in selected cases, under parametric criteria, taking advantage of the European (Mediterranean) regulatory framework in this area. The methodology will also be applied to buildings in the Central American (tropical) region, which does not yet have a consolidated framework for the regulation of environmental sustainability strategies, and which is ideal given the growing use of new industrialised technologies for building in the tropical region, immersed in a context of seismic threat. Through a process of analysis and calculation, metrics are determined to evaluate sustainability parameters, as well as the establishment of indicators to measure the optimisation of construction systems and the potential to avoid environmental impacts from the design process, considering the development of the building throughout its useful life, until its end of life. Among the main findings, it can be stated that industrialised prefabrication contributes to environmental sustainability, as the recovery of materials at the end of life leads to an average 60% reduction in the carbon footprint.

Introducción

La Organización Internacional de Normalización ISO (International Organization for Standardization [ISO], 2006), ha producido una serie de normas de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) centradas en los aspectos técnicos y organizativos de un edificio, no obstante, en términos pragmáticos, los estudios se realizan bajo enfoques diferentes y no hay suficiente claridad sobre si sus hallazgos son comparables entre sí o, si son útiles para informar en la toma de decisiones del proceso de diseño y en la posterior evaluación del edificio. Muchos autores coinciden en que es difícil hacer una comparación significativa entre los resultados y por lo tanto, obtener conclusiones para informar en la toma de decisiones de proyecto de diseño (Karaman Öztaş, 2018) (Pomponi *et al.*, 2018). Presuntamente hay varias razones como: las diferencias metodológicas, las discrepancias en el alcance de la evaluación, las incertidumbres de los datos, las diferencias en la localización y las diferencias entre unidades de análisis. A pesar de ello, en la presente investigación, en gran medida, se ha intentado superar esas barreras, mediante el desarrollo de un modelo de cálculo de LCA del tipo entradas y salidas (Chau *et al.*, 2015) (E. 1), con la incorporación de una base de datos internacional de acceso abierto (Hammond y Jones, 2008) (Global Alliance for Buildings and Construction, 2019) que permite introducir datos parametrizados de materiales para todo tipo de edificación, haciendo posible el análisis comparativo y la verificación de los parámetros que inciden en la ge-

neración de la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones analizadas, así mismo, los resultados se han contrastado con el estado del arte para verificar la incerteza.

$$CO_{2e} = CO_{2e \text{ extracción}} + CO_{2e \text{ manufactura}} + CO_{2e \text{ construcción}} + CO_{2e \text{ operación}} + CO_{2e \text{ demolición}} + CO_{2e \text{ reciclaje}} + CO_{2e \text{ disposición}} \quad E. 1$$

En conjunto se conforma como una investigación cuantitativa y cualitativa sobre la sostenibilidad ambiental en la edificación que busca responder a la pregunta: ¿Que parámetros del sector edificación inciden en la reducción de los impactos ambientales y por tanto, la huella de carbono? Para responder a esta pregunta, se desarrolla el modelo de cálculo LR en diversos edificios como casos de análisis, tanto casos europeos como casos centroamericanos, contrastando sus características constructivas y climáticas, bajo el planteamiento de la siguiente hipótesis:

“Si se define al edificio como el sistema de análisis de ciclo de vida, se proyectan como entradas a los materiales y suministros, que después de cumplir su vida útil, computan impactos ambientales como salidas de residuos, vertidos y consumos. En este sistema se plantean dos estrategias como beneficios más allá de los límites del sistema y el potencial de revertir impactos ambientales: La construcción con sistemas de prefabricación industrializada diseñada para el desmontaje, que permite la recuperación de materiales, la prolongación de la vida útil, y la circularidad, así mismo se plantea la generación energética de fuente renovable, que evita el consumo de recurso fósil para la reducción de la huella de carbono” (Rodríguez Rodríguez, 2024) (E.2).

$$CO_{2e \text{ ciclo de vida}} = CO_{2e \text{ fabricación}} + CO_{2e \text{ construcción}} + CO_{2e \text{ operatividad}} + CO_{2e \text{ nueva vida}}$$

E. 2 (Rodríguez *et al.*, 2023).

Es preciso explicar el concepto “nueva vida”, se refiere a la nueva vida de los elementos del edificio, gracias al diseño para el desmontaje que permite no solo el mantenimiento efectivo, sino que la separación de los componentes para que pueda retornar al ciclo industrial.

Metodología

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en las etapas A, B, C, D en nueve casos de estudio, tanto casos de San Salvador (tropical) como casos de Cataluña (mediterráneo), este ejercicio implica considerar información procedente de varias fuentes como datos de entrada al sistema (Rodríguez, Martínez *et al.*, 2023), en todas las fases del ciclo y este aspecto, incorpora incertidumbres que se considerarse razonables, pero se procede con el fin de encontrar tendencias que ayuden a identificar las estrategias de sostenibilidad que contribuyen a disminuir la huella de carbono bajo un análisis crítico y reflexivo (Tabla I).

Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

Tabla 1.

Metodología LCA, fuentes de datos de entrada a modelo de Cálculo LR

A1-A3	A4-A5	B1	B2-B5	C1-C3	D (B1)	D (C1-C3)
Materiales y transporte	Construcción	Operatividad	Mantenimiento	Disposición final	Operatividad evitada	Materiales evitados
1-Ambos casos: Mediciones, proyecto ejecutivo 2-Ambos casos: Densidad y masa (Ministerio de Fomento, 2010) 3-Ambos casos: Base de datos ICE (Global Alliance for Buildings and Construction, 2019) (Ministerio de Fomento, 2010) (Hammond y Jones, 2008)(International EPD System, s. f.)	1-Ambos casos: Mediciones, proyecto ejecutivo 2-Ambos casos: Densidad y masa (Ministerio de Fomento, 2010)	1-Casos CAT: Certificaciones y estudio energético 2-Casos SLV: Mediciones y factores, NZEB El Salvador (Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas, 2021)	1-Ambos casos: Mediciones, proyecto ejecutivo 2-Ambos casos: (ISO, 2008)	1-Ambos casos: Estado del arte 2-Casos CAT: (Agència de Residus de Catalunya, 2007) 3-Casos SLV: (Rodríguez y Cisneros, 2022)	1-Ambos casos: Estado del arte 2-Marco Level(s) (Dodd et al., 2021a) 3-Casos CAT: Certificaciones y estudio energético confidencial 4-Casos SLV: (SMA Solar Technology AG, 2023) y NZEB El Salvador	1-Ambos casos: Estado del arte 2-Marco Level(s) (Dodd et al., 2021b) 3-(Asociación Española de Normalización[AE-NOR], 2023)

Nota. Elaboración propia con datos del estado del arte.

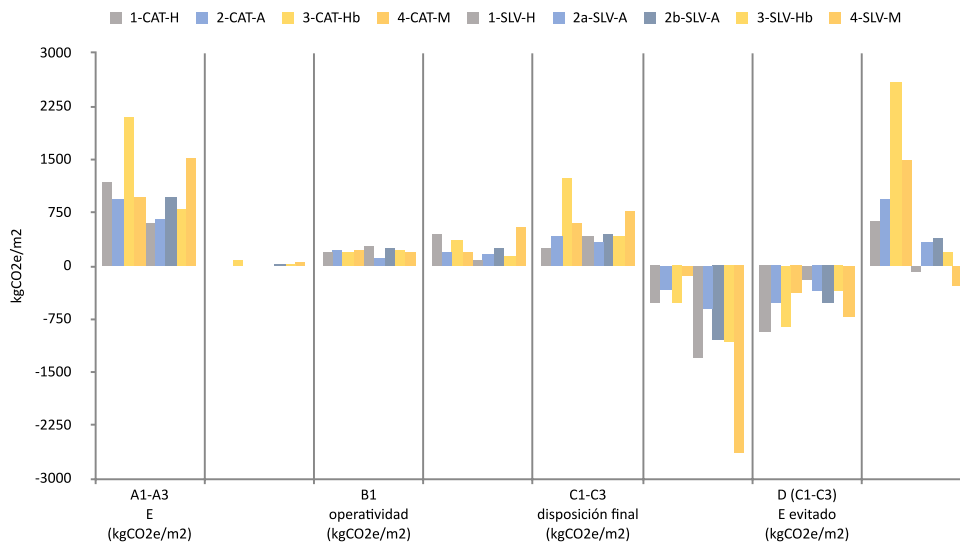
Discusión de resultados

Un hecho destacable es que el carbón incorporado A1-A3, es decir todo el material requerido para la edificación es el que computa mayor huella de carbono. Y si los edificios no son diseñados para la circularidad conlleva el incremento en la etapa C1-C3. Otro punto para resaltar es que dos edificios logran la neutralidad en carbono, gracias a los beneficios más allá de los límites del sistema con el superávit energético y son 1-SLV-H y 4-SLV-M. No obstante, los edificios CAT que cuentan con certificación energética rozan del umbral de los 1000 kgCO2e/m2 considerado como alto, según lo constatado en el estado del arte, especialmente el edificio 3-CAT-Hb este hecho debido a que la reversibilidad es muy baja ya que su sistema estructural principal es de hormigón in situ y la cimentación es profunda y con alta densidad en planta (Fig. 1).

Con base en los resultados, la hipótesis puede ser confirmada, la prefabricación industrializada es sinónimo de optimización en una perspectiva ambiental (evita desperdicios y consume menor materia prima), es apta como estrategia de diseño para el desmontaje, puesto que al final de ciclo de vida, es posible recuperar materiales con integridad física, sopesado bajo evaluación técnica.

Figura 1

Análisis de ciclo de vida LCA en $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$



Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

Nota. Rodríguez Rodríguez (2024).

Conclusiones

Entre los principales hallazgos se puede afirmar que la descarbonización en el ciclo de vida de un edificio, aún sin haber optimizado los sistemas constructivos, en etapa operativa puede ser neutral en carbono, gracias al superávit de la generación energética renovable (fotovoltaica) asociado a la incidencia solar según la latitud, siendo en el trópico un tercio mayor que en la zona mediterránea. Así mismo, se comprueba la hipótesis inicial de que la prefabricación industrializada contribuye a la sostenibilidad ambiental, a pesar de que los sistemas estructurales especializados diseñados para el desmontaje, requieren de altas prestaciones mecánicas, logradas solamente con la hibridación de materiales; su recuperación al fin de vida conlleva una disminución media del 60% de la huella de carbono.

Por otra parte, la optimización de las edificaciones puede iniciarse reduciendo su peso, especialmente en el caso de terrenos con poca capacidad de carga, dado que las cimentaciones pueden representar hasta el 20 % del carbono incorporado, influyendo considerablemente en la huella de carbono total; además al ser la cimentación monolítica su no recuperación al final de vida de la edificación redundante en pérdida de materias primas. Así mismo, La envolvente y acabados cuyo peso es menos del 20 % del peso total, contemplan valores significativos de carbono equivalente de hasta el 60 %". Estos hechos dejan un importante aprendizaje sobre realizar LCA previo al derribo de una edificación y no solo al inicio de proyecto.

Referencias

Agència de Residus de Catalunya. (2007). *Programa de Gestió de Residus de la Construcció de Catalunya PROGROC 2007-2012*. Generalitat de Catalunya Departament de Medi Ambient i Habitatge.

Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061

- Asociación Española de Normalización. (2023). *Norma UNE-ISO 20887 Sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil Diseño para el desmontaje y la adaptabilidad Principios, requisitos y directrices*. AENOR.
- Chau, C. K., Leung, T. M. y Ng, W. Y. (2015, 1 de abril). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas. (2021). *Factores de emisión del sistema eléctrico interconectado nacional de El Salvador*. DGEHM.
- Dodd, N., Donatello, S. y Cordella, M. (2021a). *Level(s) indicator 1.1: Use stage energy performance*. Joint Research Centre.
- Dodd, N., Donatello, S. y Cordella, M. (2021b). *Level(s) indicator 2.4: Design for deconstruction*. Joint Research Centre.
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2019). *Embodied Carbon - The ICE Database*. Circular Ecology.
- Hammond, G. P. y Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87-98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- International EPD System. (s.f.). *The International EPD System*. EPD. Consultado el 29 de septiembre de 2022. <https://www.environdec.com/library>
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006 (es) Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices*. Online Browsing Platform (OBP).
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO 15686-8:2008(en) Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 8: Reference service life and service-life estimation*. Online Browsing Platform (OBP).
- Karaman Öztaş, S. (2018, 29 de marzo). The Limitations of LCA Methodology Towards Sustainable Construction Materials. En S. Firat, J. Kinuthia y A. Abu-Tair (Eds.), *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017). ISBS 2017. Lecture Notes in Civil Engineering* (vol. 6, pp. 102-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_8
- Ministerio de Fomento. (2010). *Catálogo de elementos constructivos del CTE*. CTE Código Técnico de la Edificación.
- Pomponi, F., De Wolf, C. y Moncaster, A. (eds.). (2018). *Embodied carbon in buildings: Measurement, Management, and Mitigation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7>
- Rodríguez, L. y Cisneros, A. (2022, 7 de diciembre). *Estrategia de economía circular para El Salvador: Soluciones habitacionales sostenibles*. CEPAL.

- Rodríguez, L., Martínez, L., Panameño, R., París, O., Muros, A., Rodríguez, R., Javier, R. y González, C. (2023, 1 de julio). LCA of the NZEB El Salvador building, a model to estimate the carbon footprint in a tropical country. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137137. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137137>
- Rodríguez, L., Muros, A. y París, O. (2023, 25 de enero). *How to Achieve Balance in the Life Cycle Equation of a Building?* En A.K. Nagar, D. Singh Jat, D.K. Mishra y A. Joshi (Eds.), *Intelligent Sustainable Systems. Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 579, pp. 215-223). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7663-6_21
- Rodríguez Rodríguez, L. (2024). *Análisis comparativo del ciclo de vida de edificaciones construidas con prefabricación industrializada en latitudes mediterránea y tropical* [tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-416595>
- SMA Solar Technology AG. (s. f.). *Sunny Portal*. Sunny Portal. Consultado el 27 de noviembre de 2023. <https://www.sunnyportal.com/Templates/Start.aspx?ReturnUrl=%2F>

Lizeth Rodríguez
Rodríguez, Adrián Muros
Alcojor, Oriol Paris-Viviana

Análisis comparativo
del Ciclo de Vida
de edificaciones
construidas con
Prefabricación
Industrializada en
latitudes Mediterránea
y Tropical

Investigaciones UCA
2023 - 2024
Memoria bienal
Año 3, Vol. 3
Julio 2025
p (143-149)
e-ISSN: 2789-4061