

# EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE VIVIENDAS EN MADERA: EL CASO DE “LA CASA URUGUAYA”

## ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF TIMBER HOUSES: “LA CASA URUGUAYA” CASE STUDY

*Bernardette Soust-Verdaguer<sup>1,\*</sup>*

<https://orcid.org/0000-0003-0374-4470>

*Laura Moya<sup>2</sup>*

<https://orcid.org/0000-0002-4309-3847>

*Carmen Llatas<sup>1</sup>*

<https://orcid.org/0000-0001-5690-7005>

### RESUMEN

Varias medidas se están llevando a cabo en Uruguay para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, entre las que destaca la modificación de la matriz energética. En estos últimos años más del 90% de la energía eléctrica que se produjo provino de fuentes renovables, tales como la eólica, la hidroenergía o la biomasa. A pesar de estos progresos, el sector de la edificación, la construcción y el transporte continúan siendo en gran parte responsables de los impactos ambientales que producen las actividades humanas en el país. Por otra parte, diversos estudios muestran el avance en el desarrollo de metodologías de cálculo y la definición de estrategias que permitan reducirlas. En ese sentido la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es considerada una de las más transparentes y reconocidas por la comunidad científica internacional. Este estudio tiene por objetivo el desarrollo de una propuesta metodológica basada en el ACV, para calcular los impactos ambientales que producen los edificios residenciales en madera durante su ciclo de vida. La verificación experimental se desarrolla a través del caso de “La Casa Uruguay”, una vivienda social unifamiliar construida en madera. La metodología propuesta permite, a partir de la fase avanzada del diseño de la vivienda, obtener resultados de los impactos ambientales que se producen durante su ciclo de vida completo. Los resultados demuestran la relevancia de las etapas de uso (uso de energía, mantenimiento, reparación, rehabilitación y sustitución) y de producto (extracción de materias primas, fabricación y transporte) sobre el resto de las fases del ciclo de vida consideradas.

**Palabras clave:** Análisis del ciclo de vida, construcción en madera, diseño, sostenibilidad, vivienda unifamiliar, Uruguay.

### ABSTRACT

Several actions have been taken in Uruguay to reduce CO<sub>2</sub> atmospheric emissions, including modification of the energy matrix. In recent years more than 90% of electricity was produced by renewable sources, such as wind power, hydro (run-of-river) or biomass. Despite this fact, the building, construction, and transport sectors are still great responsible of the environmental impacts produced by human activities. Moreover, several studies show advances of methodologies that allow the environmental impact calculation and the definition strategies for reduction. Life Cycle Assessment (LCA) is considered one of the most transparent and rec-

<sup>1</sup>Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Sevilla, España.

<sup>2</sup>Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, Montevideo, Uruguay.

\*Corresponding author: bsoust@us.es

Received: 25.01.2021 Accepted: 13.11.2021

ognized method by the international scientific community. This study aims to develop a methodology based on LCA, to calculate the environmental impacts produced by timber buildings during their life cycle. The case study verification focuses on “La Casa Uruguaya”, a social single-family timber house. The proposed methodology allows obtaining the environmental impacts of the whole life cycle, from the detailed design stages of design. Results show the relevance of the use stage (energy consumption, maintenance, repair, refurbishment and replacement) and product stage (raw material, manufacture and transport) compared to the rest of the life cycle stages included in the study.

**Keywords:** Life cycle assessment, timber construction, design, sustainability, single-family house, Uruguay.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, diversos estudios muestran los impactos que producen los sectores de la construcción y la edificación sobre el ambiente (IPCC 2013). En el caso de Uruguay, los sectores industriales, residencial y transporte consumen más del 80% de la energía producida (DNE-MIEM 2018). Es en este contexto que se están experimentando diversos avances y tomando medidas para reducir estos impactos. Un ejemplo relevante es la progresiva implementación en la última década del 100% de fuentes renovables para producción de energía eléctrica (DNE-MIEM 2015) llevando a Uruguay a ser considerado como uno de los países con los mayores progresos en América Latina (UDEP 2016). Otro ejemplo es el continuo desarrollo del sector forestal, la industrialización de la madera y el incremento del uso estructural de la madera, considerado además como un material de creciente interés en la construcción civil (Cortazzo 2014). En este sentido, vale destacar la Ley Forestal 15939 de 1987 (Senado y Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay 1987), instrumento crucial para el desarrollo del sector, que a lo largo de más de 25 años posibilitó el crecimiento de las plantaciones renovables, cuya superficie pasó de 45000 ha a 1106819 ha entre 1990 y 2015 (MGAP 2019). Sin embargo, este crecimiento y la consecuente disponibilidad del recurso maderero no han sido acompañados de una fuerte industria destinada a producir madera estructural, ni tampoco del desarrollo de la tecnología de construcción con madera. Esta situación se evidencia en el bajo porcentaje del consumo de madera y de productos de ingeniería de madera (Engineered Wood Products EWP) en el sector de la construcción, que en 2019 representó el 1, 25 % del total de 16000000 m<sup>3</sup> de la madera extraída ese año (MGAP 2019). Por otra parte, resultaría beneficioso para Uruguay, la consolidación de la cadena de valor forestal-madera incluyendo la industrialización de productos que actualmente no se fabrican en el país tales como la madera contralaminada, los tableros de fibras orientadas y la madera micro laminada (Dieste *et al.* 2019).

En el contexto internacional, trabajos previos (Baño and Moltini 2021, Bouhala *et al.* 2020, Lähtinen *et al.* 2019, Nemry *et al.* 2008, Pajchrowski *et al.* 2014, Ramage *et al.* 2017, Skullestad *et al.* 2016) demuestran el creciente interés por la utilización de madera proveniente de fuentes renovables como material de construcción, y en particular para la construcción de edificios en altura. Nemry *et al.* (2008) demuestran mejoras significativas en los resultados de los impactos ambientales a través de la sustitución de algunos materiales de construcción usualmente considerados “convencionales” por productos derivados de la madera. No obstante, Ramage *et al.* (2017) reportan que en ocasiones estos potenciales beneficios resultan difíciles de cuantificar y generalizar.

Existen diversas metodologías y herramientas para cuantificar los impactos que producen los edificios durante su ciclo de vida, siendo la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) una de las más utilizadas y reconocidas por la comunidad científica para ese fin (Moncaster and Song 2012). En este sentido diversos trabajos demuestran las posibilidades de aplicación del ACV para analizar, evaluar y comparar los potenciales beneficios de la madera como material de construcción (Takano *et al.* 2015, Vidal *et al.* 2019, Wijnants *et al.* 2019). No obstante, Pajchrowski *et al.* (2014) señalan a los impactos que se producen en la etapa de uso (derivados del empleo de barnices, pinturas y otros materiales de protección y preservación), como un punto débil de este material. Por su parte, Ramage *et al.* (2017) subrayan la necesidad de analizar los beneficios del uso de la madera teniendo en cuenta los impactos derivados de su transporte. Adicionalmente, Breton *et al.* (2018) alertan que dada la confianza cada vez mayor en el LCA para la toma de decisiones y diseño de políticas, una evaluación incorrecta del carbono biogénico en los materiales podría conducir a estrategias contraproducentes. En la misma línea, Soust-Verdaguer *et al.* (2020) señalan que la estimación del carbono biogénico en los productos de madera representa una oportunidad para incorporar a este tipo de métodos enfocados en la fase de diseño. En el contexto actual, existe un creciente desarrollo de trabajos que demuestran las potencialidades del uso de la metodología Building Information Modelling (BIM) como instrumento de ayuda para las edificaciones y obras de construcción sostenibles. Muchos de ellos son utilizados para optimizar el desempeño del edificio y reducir sus impactos ambientales a través de la implementación de métodos

basados en el ACV (Obrecht *et al.* 2020). En este sentido, diversos trabajos (Peng 2014, Soust-Verdaguer *et al.* 2017) señalan como algunas de las dificultades derivadas de la integración de ambas metodologías (BIM-ACV), la insuficiencia de los datos contenidos en los modelos BIM para llevar adelante el ACV. Por ello Soust-Verdaguer *et al.* (2018) desarrollaron un marco metodológico que permitió enriquecer los datos incluidos en BIM como instrumento de ayuda en el diseño de envolventes de viviendas unifamiliares en Uruguay. Posteriormente, un método similar fue llevado a cabo por Soust-Verdaguer *et al.* (2020) para comparar viviendas que emplean tecnologías y materiales tradicionales frente a una alternativa que utiliza la madera como material de construcción. Estos avances metodológicos, sumado a los devenidos de la generación de electricidad a partir de fuentes renovables, al incremento de la superficie forestada y el potencial de producción de materiales biodegradables, permiten visualizar a Uruguay como campo fértil para la experimentación e identificación de oportunidades de innovación para reducir los impactos ambientales que producen los edificios en el contexto uruguayo.

El objetivo de este trabajo es la evaluación de los impactos ambientales que produce una vivienda en madera desarrollada en el contexto de Uruguay mediante la aplicación de la metodología del ACV. Una de las novedades que se presenta radica en el desarrollo de un método para estimar los impactos producidos durante el ciclo de vida completo de edificios construidos en madera en el contexto uruguayo, que pueda ser aplicado durante las fases de diseño e integrado en plataformas BIM. Otra novedad es la adaptación regional de los datos a utilizar y la estimación del carbono biogénico contenido en los productos de madera, señalado anteriormente.

### Material y método

El método propuesto se define atendiendo al cumplimiento de las normas técnicas ISO 14040 (2006b), ISO 14044 (2006a), ISO 21930 (2017), ISO 21931-1 (2010), y a trabajos previos (Soust-Verdaguer *et al.* 2020, Soust-Verdaguer *et al.* 2018). La aplicación del ACV se desarrolla siguiendo las cuatro fases definidas por la ISO 14040-2006 (2006b): definición del alcance y objetivos, elaboración del inventario del ciclo de vida, análisis del inventario del ciclo de vida, e interpretación de los resultados. El método se concibe como un “puente” entre la metodología BIM y el ACV, y tiene como objetivo principal solventar la falta de datos para llevar adelante el ACV en el entorno BIM (Soust-Verdaguer *et al.* 2020).

Por otra parte, el método propuesto busca integrar las características del caso de estudio, para verificar durante la fase de diseño los potenciales impactos que produciría una vivienda construida en madera durante su ciclo de vida. Cabe señalar que resulta preciso realizar diversas simplificaciones, suposiciones e hipótesis. La verificación experimental se desarrolló en ArchiCAD 19 (Graphisoft 2017). A nivel operativo, para el cálculo de los impactos ambientales se utilizaron planillas de cálculo de Microsoft Excel 365 vinculadas automáticamente a los datos del modelo BIM (cantidades de materiales) para obtener en tiempo real, los resultados de los impactos ambientales que producen los materiales y los elementos constructivos contenidos en el modelo BIM de la vivienda. Vale señalar que, en esta metodología, “tiempo real” se refiere al tiempo en sincronía con la fase de diseño, es decir que no se requiere de un tiempo adicional para realizar los cálculos de los impactos ambientales, una vez finalizado el diseño del modelo BIM.

### Caso de estudio

Para el desarrollo del trabajo se seleccionó “La Casa Uruguaya” (LCU) (Universidad ORT Uruguay 2015), como modelo de referencia sobre la utilización de madera en el desarrollo de una vivienda. LCU, fue diseñada por estudiantes de arquitectura aplicando criterios de sostenibilidad que le permitieron ganar el Primer Premio en el concurso Solar Decathlon Latinoamérica 2015. La vivienda se instaló inicialmente y en forma temporal, en Santiago de Cali, y luego definitivamente en Montevideo, por lo que para este estudio se consideró el contexto de Montevideo como su lugar de emplazamiento. LCU tiene tres dormitorios, una superficie útil de 63 m<sup>2</sup> aprox. y está construida enteramente (estructura y cerramientos) en madera (Tabla 1). La Figura 1 muestra una vista del modelo en 3D desarrollado en BIM, para el desarrollo de este método.



**Figura 1:** Vistas del modelo 3D de LCU desarrollado en BIM.

**Tabla 1:** Resumen de las principales características de la vivienda.

Sistema constructivo		
Envolvente		
	Muro exterior	Placa de madera contrachapada (Exterior) 12 mm Lana de vidrio 100 mm Polietileno 200µm, Placa de madera contrachapada (Interior) 12mm
	Cubierta	Placa de madera contrachapada (Exterior) 12 mm Lana de vidrio 100 mm Polietileno 200µm, Placa de madera contrachapada (Interior) 12mm
	Ventanas	PVC, doble vidrio
	Puertas	PVC, doble vidrio
Estructura		
	Vigas y cerchas	Madera de <i>Eucalyptus grandis</i>
	Estructura de marcos	Madera aserrada de <i>Eucalyptus grandis</i>
	Pilares	-
	Fundaciones	Pilotes de madera de <i>Eucalyptus grandis</i> (temporales)
Particiones Interiores		
	Tabique interior	Placa de madera contrachapada (interior) 12 mm, Lana de vidrio 100 mm, Placa de madera contrachapada (interior) 12 mm
	Puertas	Madera de <i>Eucalyptus grandis</i>
Terminaciones		
	Muro/Cubierta	Pintura madera (interior)
	Muro	Pintura madera (exterior)
	Muro	Azulejo cerámico
	Cubierta	Pintura madera (interior)

## Aplicación del método al caso de estudio

### Definición del alcance y objetivo

De acuerdo con la ISO 21930 (2017) el objeto de la evaluación abarca los procesos desde la *cuna a la tumba* (“cradle-to-grave”), incluyendo el ciclo de vida completo de la vivienda y considerando los módulos del ciclo de vida especificados en la Tabla 2. La unidad funcional considerada fue de 1 m<sup>2</sup> de superficie útil de

edificio acondicionado con una vida útil de 60 años, valor tomado como referencia a partir de trabajos similares desarrollados en este contexto (Peluso 2011). El modelo BIM utilizado para desarrollar el ACV incluyó los siguientes sistemas constructivos: Envoltente, Estructura, Terminaciones y Particiones interiores. Los elementos y materiales constructivos incluidos en la evaluación se describen en la Tabla 1.

**Tabla 2:** Esquema de módulos de información definidos por la ISO 21930 (2017) incluidos en el caso de estudio.

Información del ciclo de vida																
A1-A3			A4-A5		B1-B7							C1-C4				D
Etapa de producto			Etapa de construcción		Etapa de uso							Etapa de fin de ciclo de vida				Información adicional más allá del ciclo de vida
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Suministro de materias primas	Transporte	Fabricación	Transporte	Proceso de construcción e instalación	Uso	Mantenimiento	Reparación	Sustitución	Rehabilitación	Consumo de energía en fase operacional	Consumo de agua en fase operacional	Deconstrucción	Transporte	Tratamiento de residuos	Disposición final	Beneficios y cargas más allá del sistema
X	X	X	X	X		X	X	X		X		X	X		X	

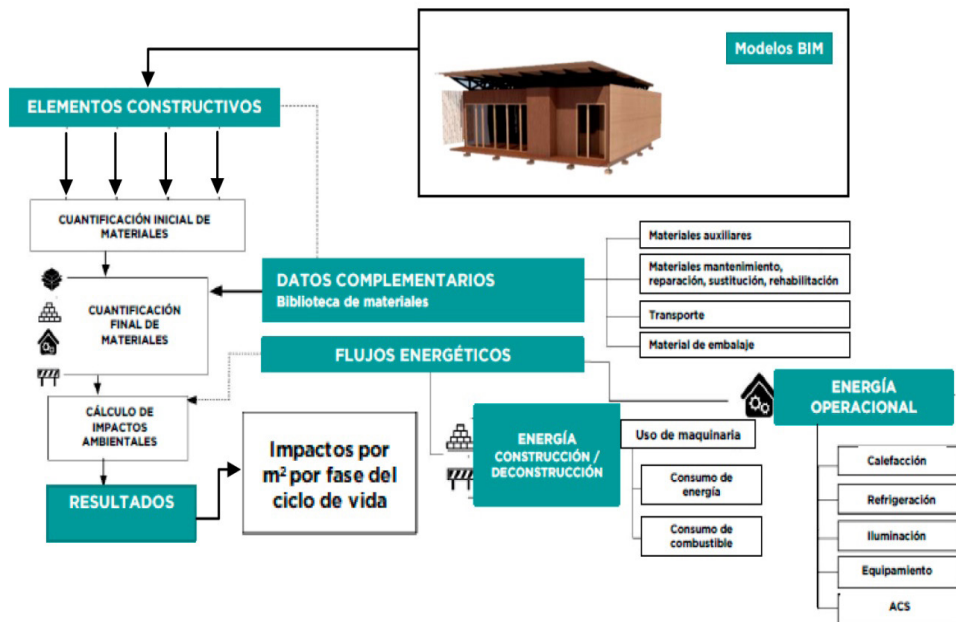
Fuente: elaboración basada en ISO 21930 (2017).

### Inventario del ciclo de vida

Para la elaboración del inventario del ciclo de vida se partió del modelo BIM desarrollado en ArchiCAD 19 (Graphisoft 2017), desde donde se extrajo de forma automática un listado con las cantidades de materiales y componentes, que fue denominado “Cuantificación inicial de los materiales”. Posteriormente estos datos fueron enriquecidos mediante el desarrollo del llamado “Datos complementarios. Biblioteca de materiales”. A continuación, estos datos enriquecidos formaron parte de la “Cuantificación final de los materiales”. El resto de los datos complementarios y cálculos fueron organizados de acuerdo con el esquema de la Figura 2.

Los Datos Complementarios para llevar adelante la aplicación del ACV, contenidos en la biblioteca de materiales, se desarrollaron a partir de la definición de los escenarios del ciclo de vida considerando las prácticas actuales, es decir, las más frecuentes en el contexto de referencia, y considerando trabajos previos sobre la temática. Las variables existentes se ajustaron lo máximo posible al escenario actual y al potencialmente futuro, en el que se inserta la vivienda LCU. Estos escenarios que incluyen, mantenimiento, reparación, rehabilitación y sustitución de la vivienda, así como los períodos de estudio de referencia de los materiales y componentes utilizados, se definieron a partir de trabajos previos desarrollados en el contexto uruguayo y latinoamericano (Casañas 2011, Mimbacas 2012, Peluso 2011, Soust-Verdaguer 2017). Los datos relativos a los impactos producidos durante la etapa de producto fueron obtenidos de la base de datos ambientales Ecoinvent versión 3.10 (Ecoinvent 2020), la más utilizada a nivel mundial en el ACV de esta tipología (Soust-Verdaguer *et al.* 2016). Para la selección de los procesos unitarios se ha priorizado la utilización de datos regionales (Uruguay, Brasil y Argentina), así como datos globales. En última instancia se han utilizado datos promedio de Europa o datos específicos de Suiza (los más frecuentes en la base de datos Ecoinvent). Como escenario de fin de ciclo de vida se consideró la disposición en vertedero de los residuos, la práctica más habitual en este contexto según (Fichtner-LKSUR Asociados 2004). No obstante, se consideró el escenario de la incineración de la madera y los productos derivados de la madera para la etapa final del ciclo de vida, asumiéndose la caracterización de los flujos de carbono y la neutralidad de carbono que propone la norma EN 16485 (2014a). La estimación del

carbono biogénico contenido en la madera y los productos de la madera y su conversión en emisiones de CO<sub>2</sub>, se realizó de acuerdo con la norma EN 16449 (2014b), la cual considera la aproximación -1/+1 (estática) para la cuantificación del carbono biogénico según lo define Hoxha *et al.* (2020).



**Figura 2:** Esquema de la metodología utilizada para la aplicación del ACV.

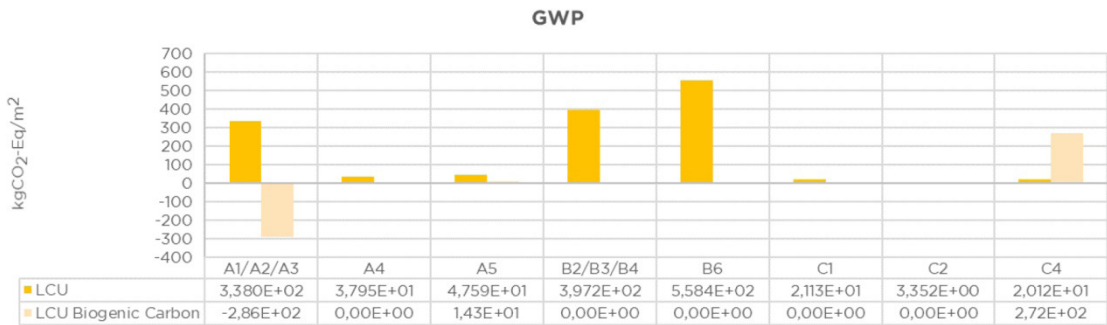
El cálculo de los Flujos energéticos se realizó mediante el siguiente procedimiento. Para la cuantificación de la Energía operacional en etapa de uso, se realizó una simulación y cálculo del desempeño energético de la vivienda durante su ciclo de vida, independientemente en Design Builder (Tindale 2005) de acuerdo con las especificaciones de Soust-Verdaguer (2017). Para la demanda energética promedio (invierno/verano) se tomó un valor de 57 kWh/m<sup>2</sup>/año, considerado como base para el cálculo de los impactos producidos durante el ciclo de vida de LCU. Para la cuantificación de la demanda energética se asumió que la principal fuente de producción de energía de las viviendas unifamiliares es la energía eléctrica (Ministerio de Industria Energía y Minería 2015). Para la producción de electricidad para energía primaria, calefacción y refrigeración en fase de uso, se asumió que se realiza a través de la red eléctrica nacional, mediante las siguientes fuentes de producción: 61% hidroeléctrica, 17% eólica, 15% biomasa, 6,6 % fueloil y 0,4 % solar fotovoltaica (DNE-MIEM 2015). Finalmente, el cálculo de los consumos energéticos (electricidad y combustible) durante la fase de construcción y deconstrucción se desarrolló mediante estimaciones extraídas a partir de Kellenberger *et al.* (2007).

#### **Evaluación del inventario del ciclo de vida**

Las categorías de impacto seleccionadas y los métodos de evaluación de los impactos fueron los siguientes: i) Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential- GWP), la más utilizada en el ACV de viviendas unifamiliares (Soust-Verdaguer *et al.* 2016), cuantificada de acuerdo con el IPCC (2013), ii) Potencial de Acidificación (Terrestrial Acidification Potential-TAP), iii) Potencial de Eutrofización (Freshwater Eutrophication Potential-FEP), iv) Ecotoxicidad del Agua (Freshwater Eco Toxicity Potential-FETP), v) Toxicidad Humana (Human Toxicity (HT)) y vi) Potencial del Agotamiento del Ozono (Ozone Depletion Potential-OPD); y los cinco últimos evaluados mediante el método ReCiPe V 1.13 Midpoint (H) (Huijbregts *et al.* 2020). Estas categorías de impacto fueron seleccionadas dada su relevancia para el contexto de referencia según se detalla en Soust-Verdaguer (2017).

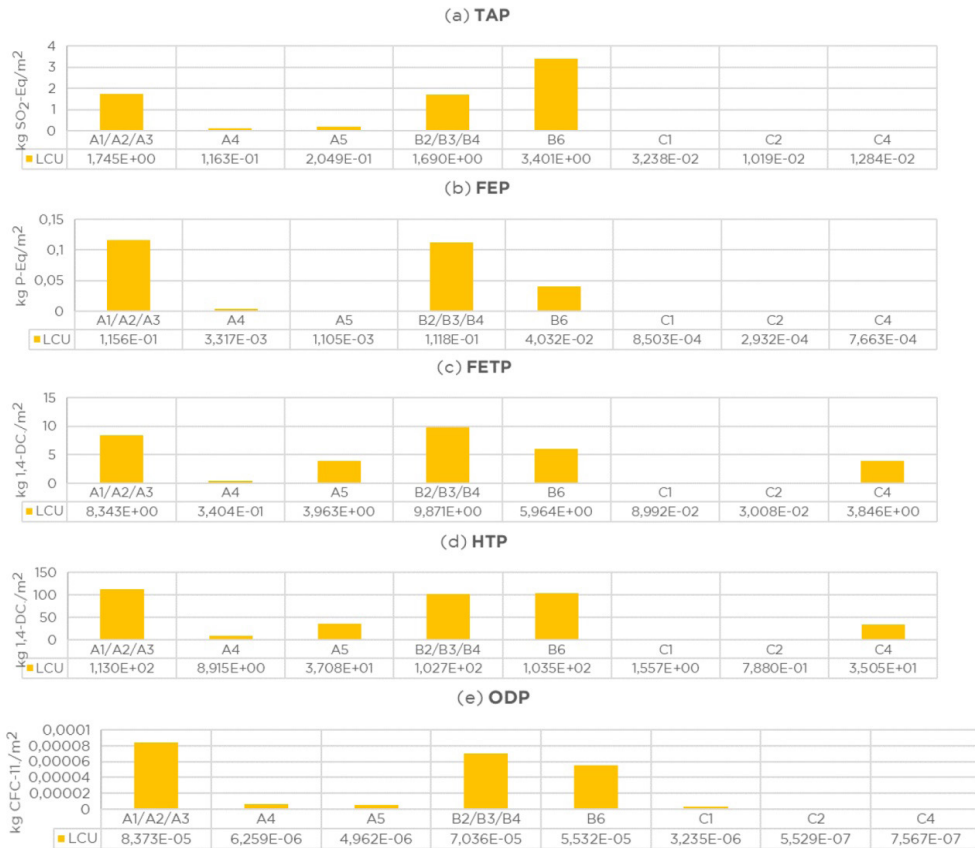
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 y Figura 4 muestran los resultados para las categorías de impacto analizadas, donde se visualizan los impactos de acuerdo con las fases del ciclo de vida detalladas en la Figura 2. Se puede observar la heterogeneidad en los impactos producidos por la vivienda LCU dependiendo de las fases del ciclo de vida y la categoría de impacto ambiental considerada. Los resultados de los impactos se muestran por metro cuadrado de superficie útil de vivienda, considerando una vida útil de 60 años.



**Figura 3:** Resultados obtenidos para las categorías Potencial de Calentamiento Global (GWP) ( $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ) incluyendo de forma separada la estimación del carbono biogénico.

Para todas las categorías de impacto, la etapa de uso (B2-B4, B6) fue la de mayor incidencia total, donde los impactos asociados al consumo energético en fase de uso (B6) y los impactos derivados del mantenimiento (B2), la reparación (B3) y la sustitución (B4) fueron relevantes. En ese sentido, la importancia de la elección de los materiales en el cómputo total de los potenciales impactos que producen no sólo en la etapa de producto (A1-A3) sino a lo largo del ciclo de vida de LCU, resulta evidente. Explica además la relevancia de los impactos (futuros) que tendrá el uso de la madera en relación con el uso periódico de pinturas para su mantenimiento y reparación. En este caso en particular ha incidido negativamente en los resultados el uso de disolventes y pinturas alquídicas para el tratamiento de la madera.



**Figura 4:** Resultados obtenidos para las categorías (a)Potencial de Acidificación Terrestre (TAP) (kgSO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>), (b) Potencial de Eutrofización del Agua (FEP) (kgPO<sub>4</sub>eq/m<sup>2</sup>), (c) Ecotoxicidad del Agua (FETP) (kg 1,4-DCB-eq/m<sup>2</sup>), (d) Toxicidad Humana (HTP) (kg CFC-11-eq/m<sup>2</sup>) y (e) Potencial de Agotamiento del Ozono(ODP)(kg 1,4-DCB-eq/m<sup>2</sup>).

Por otra parte, cabe destacar que a diferencia de otros estudios (Takano *et al.* 2015) que se apoyan en el ACV de viviendas de madera para cuantificar sus impactos ambientales, es posible comprobar la relevancia de la fase de producto y de uso referidas al mantenimiento, la reparación y la sustitución (B2-B4), frente a la de energía operacional (B6) que suele ser la más elevada. Por ejemplo, en el caso de (Takano *et al.* 2015) los valores obtenidos para el GWP en el módulo de energía operacional (B6) alcanzan casi tres veces los impactos producidos en la fase de producto, mientras que en el presente trabajo no alcanzan a superar el doble (Figura 3). Esto se debe a las características de la vivienda en relación con el contexto, las cuales determinan la demanda energética en fase operacional, y a la matriz energética utilizada para el cálculo de los impactos. Por otra parte, si consideramos un tipo similar de vivienda construida en el contexto Latinoamericano (1 planta y 62 m<sup>2</sup> construidos), en el trabajo de Oyarzo *et al.* (2014) se reporta la elevada incidencia de la fase de uso en el balance global de energía primaria, resultados que son concordantes con los encontrados en el presente estudio. En el caso de LCU se puede comprobar cómo afecta positivamente en todas las categorías de impacto analizadas, el poseer una matriz energética fuertemente compuesta por fuentes de generación de energía mayoritariamente renovables. Adicionalmente, destaca la baja incidencia (2 %-3%) de la fase de transporte a la obra (A4), demostrando que el uso de la materia prima (madera de producción nacional) permite reducir los impactos producidos.

La integración de forma separada del contenido de carbono biogénico permite identificar de forma clara cuál será el potencial de captura de CO<sub>2</sub> derivado del uso de la madera y de los productos de la madera que utiliza la vivienda. Por otra parte, dependiendo del escenario de fin de vida que se asuma se podrá determinar la cantidad de emisiones derivadas de la incineración que podrían ser recuperadas mediante la generación de energía (beneficios ambientales cuantificados en el Módulo D). No obstante, la aproximación utilizada para



el cálculo del carbono biogénico (estática) podría presentar limitaciones en cuanto a la consideración del uso del suelo y al cambio del uso del suelo (Land Use and Land-Use Change (LULUC)) de acuerdo con lo descrito en Hoxha *et al.* (2020). Esas limitaciones podrían resolverse incorporando en las estimaciones en la fase de diseño, aproximaciones dinámicas que hayan sido previamente simplificadas. Otra limitación detectada en este método está relacionada con las categorías de impacto y los indicadores seleccionados para calcular los impactos ambientales. Indicadores que describen el uso de recursos, renovables y no renovables, información ambiental adicional como la generación de residuos peligrosos y no peligrosos, y la contaminación del aire, entre otros, podrían ser considerados en el método. Varios de estos indicadores han sido empleados para la evaluación de viviendas en madera (Takano *et al.* 2015, Oyarzo y Peuportier 2014, Garay *et al.* 2021), y algunos de ellos han sido recogidos en la norma ISO 21930 (2017) como indicadores no estrictamente derivados del ACV. La incorporación de estos indicadores durante la fase de diseño aportará información valiosa para la toma de decisiones por parte del diseñador. Por otra parte, ha sido posible comprobar que la metodología desarrollada en este trabajo presenta potencialidades para ser aplicada en otros contextos y ámbitos geográficos. Las hipótesis para la definición de escenarios y los criterios para la incorporación de datos sobre las características del contexto analizado pueden ser utilizados para cuantificar los impactos ambientales durante la fase de diseño de viviendas unifamiliares de madera en contextos diferentes al del presente estudio. Finalmente, los resultados muestran las posibilidades del método que integra el ACV en BIM, para estimar de forma sencilla desde las fases de diseño, los impactos potenciales que produce una vivienda construida en madera en Uruguay.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el cálculo de los impactos ambientales producidos por una vivienda construida con madera, aplicando la metodología de ACV integrada en BIM e incluyendo la estimación de carbono biogénico descrita en la normativa de referencia.

Para las categorías de impacto estudiadas, la etapa de uso del ciclo de vida, de consumo energético B6, de mantenimiento, B2 de reparación, B3 y de sustitución B4, y en segundo lugar la etapa de producto A1-A3, resultaron las más relevantes. En el caso de estudio se observó la gran incidencia de la elección del material madera, en los impactos posteriores producidos en la etapa de uso B2-B5, debido al empleo de pinturas y disolventes para su conservación y mantenimiento. La sustitución de estos productos nocivos para la preservación y el mantenimiento de la madera, por otros de menor toxicidad, podría derivar en reducciones sustanciales de los impactos producidos en la etapa de uso.

Adicionalmente, vale señalar que los resultados de este estudio sugieren que la metodología desarrollada presenta potencialidades para ser aplicada en otros contextos y ámbitos geográficos. Las hipótesis para definir escenarios y los criterios para incorporar datos sobre las características del contexto pueden ser utilizados para la cuantificación de los impactos ambientales durante la fase de diseño de viviendas unifamiliares en madera en contextos diferentes al de este estudio. Para futuros trabajos, se recomienda aumentar la base de datos, continuar el desarrollo de hipótesis de cálculo de impactos ambientales centrados en escenarios adaptados al contexto uruguayo, y la correspondiente validación y estandarización.

## AGRADECIMIENTOS

A los integrantes del proyecto La Casa Uruguaya por la documentación que permitió llevar a cabo este trabajo.

## REFERENCIAS

**Baño, V.; Moltini, G. 2021.** Experimental and numerical analysis of novel adhesive-free structural floor panels (TTP) manufactured from timber-to-timber joints. *J Build Eng* 35:102065. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102065>

**Bouhala, L.; Fiorelli, D.; Makradi, A.; Belouettar, S.; Sotayo, A.; Bradley, D.F.; Guan, Z. 2020.** Advanced numerical investigation on adhesive free timber structures. *Compos Struct* 246: 112389. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112389>

**Breton, C.; Blanchet, P.; Amor, B.; Beauregard, R.; Chang, W.S. 2018.** Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main dynamic approaches. *Sustain* 10(6): 2020. <http://doi.org/10.3390/su10062020>

**Casañas, V. 2011.** La energía como indicador del impacto ambiental de los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional. Magister Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75713/000883273.pdf?sequence=1>

**Cortazzo, T. 2014.** Industria verde. *Enlaces* 12: 29-44. [http://www.ricaldoni.org.uy/images/enlaces/enlaces\\_12.pdf](http://www.ricaldoni.org.uy/images/enlaces/enlaces_12.pdf)

**Dieste, A.; Cabrera, M.N.; Clavijo, L.; Cassella, N. 2019.** Analysis of wood products from an added value perspective: The Uruguayan forestry case. *Maderas-Cienc Tecnol*21(3): 305 - 316 <http://doi.org/10.4067/s0718-221x2019005000303>

**DNE-MIEM. Dirección Nacional de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2018.** Balance Energético Nacional Uruguay 2018. Montevideo, Uruguay. <https://ben.miem.gub.uy/matrices.php>

**DNE-MIEM. Dirección Nacional de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2015.** Balance energético Nacional Uruguay 2015. Montevideo, Uruguay. <https://ben.miem.gub.uy/matrices.php>

**Ecoinvent. 2020.** Ecoinvent. Dübendorf, Switzerland. <https://ecoinvent.org/>

**EN. 2014a.** Round and sawn timber-environmental product declarations-product category rules for wood and wood-based products for use in construction. EN 16485. 2014. EN: Brussels, Belgium. [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP\\_PROJECT,FSP\\_ORG\\_ID:37325,6156&cs=178C72203685CADB-FE49320961F3BAF7B](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:37325,6156&cs=178C72203685CADB-FE49320961F3BAF7B)

**EN. 2014b.** Wood and wood-based products - Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide. EN 16449. 2014. EN: Brussels, Belgium. [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP\\_PROJECT,FSP\\_ORG\\_ID:35343,6156&cs=1712A507562970583AB16F-125932CC064](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:35343,6156&cs=1712A507562970583AB16F-125932CC064)

**Fichtner-LKSUR Asociados. 2004.** Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana TOMO VI: Residuos de Obras Civiles. República Oriental del Uruguay, Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la Dirección de Proyectos de Desarrollo, Montevideo, Uruguay. [https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/plan\\_director/etapa1\\_estudios\\_basicos/Tomo\\_VI-ROC.PDF](https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/plan_director/etapa1_estudios_basicos/Tomo_VI-ROC.PDF)

**Garay, R.; Pfenniger, F.; Castillo, M.; Fritz, C. 2021.** Quality and Sustainability Indicators of the Prefabricated Wood Housing Industry-A Chilean Case Study. *Sustain* 13(8523): 13. <https://doi.org/10.3390/su13158523>

**Graphisoft. 2017.** Archicad 19. <http://www.graphisoft.es/>

**Hoxha, E.; Passer, A.; Saade, M.R.M.; Trigaux, D.; Shuttleworth, A.; Pittau, F.; Allacker, K.; Habert, G. 2020.** Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Build Cities* 1: 504-524. <http://doi.org/10.5334/bc.46>

**Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; van Zelm, R. 2020.** Correction to: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* 25:1635. <http://doi.org/10.1007/s11367-020-01761-5>

**IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.** Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC. Cambridge University Press: New York, USA. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)

**ISO. International Organization for Standardization. 2019.** Sustainability in buildings and civil engineering works - Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works - Part 2: Civil engineering, ISO 21931-2:2019. <https://www.iso.org/standard/61696.html>

**ISO. International Organization for Standardization. 2017.** Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services. ISO 21930. 2017. <https://www.iso.org/standard/61694.html>

**ISO. International Organization for Standardization. 2006a.** Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. ISO 14044. 2006. <https://www.iso.org/standard/38498.html>

**ISO. International Organization for Standardization. 2006b.** Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. ISO 14040. 2006. <https://www.iso.org/standard/37456.html>

**Kellenberger, D.; Althaus, H.-J.; Künniger, T.; Lehmann, M.; Jungbluth, N.; Thalmann, P. 2007.** Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7, Ecoinvent: Dübendorf, Switzerland. [https://db.ecoinvent.org/reports/07\\_BuildingProducts.pdf?area=463ee7e58cbf8](https://db.ecoinvent.org/reports/07_BuildingProducts.pdf?area=463ee7e58cbf8)

**Lähtinen, K.; Toppinen, A.; Malm, N. 2019.** Effects of Lobbying Among Urban Planners in Finland – Views on Multi-Storey Wooden Building. *Bioprod Bus* 4(7): 77-92. <https://doi.org/10.22382/bpb-2019-007>

**Mimbacas, A. 2012.** Caracterizacáo do consumo doméstico de materiais da cidades de Montevideú mediante Análise de Fluxos de Materiais. PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/105017>

**MGAP. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 2019.** Estadísticas Forestales 2020 Dirección General Forestal. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas-boletin-estadisticas-forestales-2019>

**Ministerio de Industria Energía y Minería. 2015.** Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015-2024. [http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/22654/Plan\\_Nacional\\_de\\_Eficiencia\\_Energetica.pdf/2e21a8c6-3492-4c7d-b6ba-33b138632a85](http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/22654/Plan_Nacional_de_Eficiencia_Energetica.pdf/2e21a8c6-3492-4c7d-b6ba-33b138632a85)

**Moncaster, A.; Song, J-Y. 2012.** A comparative review of existing data and methodologies for calculating embodied energy and carbon of buildings. *Int J Sust Build Tech Urban Develo* 3(1) 23-36. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2012.673915>

**Nemry, F.; Uihlein, A. 2008.** Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building). IPTS-JRC, European Commission. <http://ccsl.iccip.net/jrc46667.pdf>

**Obrecht, T.P.; Röck, M.; Hoxha, E.; Passer, A. 2020.** BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustain* 12(14): 5534. <https://doi.org/10.3390/su12145534>

**Oyarzo, J.; Peupartier, B. 2014.** Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *J Clean Prod* 69: 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>

**Pajchrowski, G.; Noskowiak, A.; Lewandowska, A.; Strykowski, W. 2014.** Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Constr Build Mater* 52(2014): 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.066>

**Pelufó, P. 2011.** Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay. Magister Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/105078>

**Peng, C. 2016.** Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *J Clean Prod* 112(2016): 453-465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>

**Ramage, M.H.; Burr ridge, H.; Busse-Wicher, M.; Fereday, G.; Reynolds, T.; Shah, D.U.; Wu, G.; Yu, L.; Fleming, P.; Densley-Tingley, D.; Allwood, J.; Dupree, P.; Linden, P.F.; Scherman, O. 2017.** The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renew Sustain Energy Rev* 68(2017): 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

**Senado y Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. 1987.** Ley Forestal 15939. [http://www.sice.oas.org/investment/natleg/ury/l\\_forestal\\_s.pdf](http://www.sice.oas.org/investment/natleg/ury/l_forestal_s.pdf)

**Skullestad, J.L.; Bohne, R.A.; Lohne, J. 2016.** High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives. *Energy Procedia* 96: 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>

**Soust-Verdaguer, B. 2017.** Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales. Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada. PhD Thesis. Universidad de Sevilla, Sevilla, España. <https://idus.us.es/handle/11441/74571>

**Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A. 2017.** Critical review of BIM-based LCA method to buildings. *Energy Build* 136(1): 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>

**Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A. 2016.** Simplification in life cycle assessment of single-family houses: a review of recent developments. *Build Environ* 103: 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>

**Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A.; Gómez de Cózar, J.C. 2018.** BIM-based LCA method to analyze envelope alternatives of single-family houses: case study in Uruguay. *J Archit Eng* 24(3): 05018002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000303](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000303)

**Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; Moya, L. 2020.** Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage. *J Clean Prod* 277 (2020): 121958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121958>

**Takano, A.; Hafner, A.; Linkosalmi, L.; Ott, S.; Hughes, M.; Winter, S. 2015.** Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *Eur J Wood Prod* 73(2015): 299-312. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0890-4>

**Tindale, A. 2005.** Design Builder software. <https://designbuilder.co.uk/>.

**UNEP. United Nations Environment Programme. 2016.** Renewable energy and energy efficiency in developing countries: contributions to reducing global emissions. <https://www.unenvironment.org/resources/publication/renewable-energy-and-energy-efficiency-developing-countries-contributions>

**Universidad ORT Uruguay. 2015.** La casa Uruguaya. <https://www.lacasauruguay.com/>

**Vidal, R.; Sánchez-Pantoja, N.; Martínez, G. 2019.** Life cycle assessment of a residential building with cross-laminated timber structure in Granada-Spain. *Inf Construcción* 71 (554):e289. <https://doi.org/10.3989/ic.60982>

**Wijnants, L.; Allacker, K.; De Troyer, F. 2019.** Life-cycle assessment of timber frame constructions – The case of rooftop extensions. *J Clean Prod* 216: 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.278>