



Received: 06-12-2019
Accepted: 16-12-2019

Anales de Edificación
Vol. 5, Nº3, 76-91 (2019)
ISSN: 2444-1309
Doi:10.20868/ade.2019.4374

Análisis de ciclo de vida en viviendas: un caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social

Life Cycle Assessment of dwellings: a case of study that contrasts masonry wall with wood-frame wall in a social housing

Héctor Hernández López^a, Alfonso Cobo-Escamilla^b, Inmaculada Martínez-Pérez^c

^aE.T.S. de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid (hector.hernandez.lopez@alumnos.upm.es; alfonso.cobo@upm.es; i.martinez@upm.es)

Resumen— Esta investigación se centra en el análisis del ciclo de vida de una vivienda social chilena, para la cual es evaluado el cambio de muros de albañilería a muros estructurados en madera. Los cambios fueron evaluados en tres zonas climáticas donde el uso de muro de albañilería predomina sobre el muro estructurado en madera (Antofagasta, Santiago y Concepción). Para todas las zonas climáticas analizadas, las modelaciones mostraron que la vivienda social con muros estructurados en madera es más sustentable y confortable térmicamente. Por ejemplo, para la vivienda modelada en Santiago, los indicadores de impacto ambiental para energía acumulada demandada y para gases de efecto invernadero caen en 10,4% y 11,5% respectivamente. Además, destaca la energía incorporada más baja en la casa modelada con muros estructurados en madera, aproximadamente un tercio menor. Los resultados corresponden a una tipología de vivienda social chilena, donde la incorporación de elementos para reforzar la albañilería es característico en un país altamente sísmico como lo es Chile.

Palabras Clave— Sustentabilidad, análisis de ciclo de vida, vivienda social, muro albañilería, muro madera.

Abstract— This research focuses on life cycle assessment of a Chilean social housing, for which the change of masonry walls to wood-frame walls is analyzed. The changes were appraised in three climatic zones where the use of the masonry wall predominates over the wall structured in wood (Antofagasta, Santiago and Concepción). For all analyzed climatic zones, the model showed that social housing with wood-frame walls is more sustainable and thermally comfortable. For example, to the dwelling modeled in Santiago, the environmental impact indicators for cumulative energy demand and greenhouse gases fall in 10.4% and 11.5% respectively. In addition, the lowest embodied energy in the house modeled with wood-frame wall stands out, approximately one third less. The results correspond to a typology of Chilean social housing, where the incorporation of elements to reinforce the masonry is characteristic in a highly seismic country like Chile is.

Index Terms— Sustainability, Life Cycle Assessment, social housing, masonry wall, wood-frame.

I. INTRODUCTION

El calentamiento global y sus efectos son una de las principales preocupaciones de la sociedad moderna. El mundo ha ido tomando mayor conciencia respecto a los

impactos ambientales que conlleva la producción de los diferentes sectores industriales, sobre todo el sector residencial que a nivel global representa el 27% del consumo de energía y el 17% de las emisiones de CO₂ al ambiente (Nejat,

H.E. Hernández López es alumno de doctorado en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

I. Martínez-Pérez y A. Cobo-Escamilla son profesores en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Jomehzadeh, Taheri, Gohari, & Muhd, 2015). Así, resulta fundamental analizar el impacto ambiental que presentan las edificaciones, donde el análisis de ciclo de vida (ACV) se muestra como una herramienta útil e internacionalmente aceptada para evaluar el desempeño ambiental de las viviendas (Fouquet et al., 2015).

En Chile, cerca del 86% de las viviendas fueron construidas antes de que entrara en vigencia la primera etapa de la reglamentación térmica el año 2000 (CDT, 2010). Regulación que al día de hoy divide el territorio chileno en 7 zonificaciones térmicas que van desde zona Z1 a la zona Z7. Esta clasificación se hizo a partir de la mensura de Grados-Día de calefacción anuales (GDc), donde Z1 y Z7 representan las zonas con menor y mayor cantidad de GDc respectivamente. (Bustamante, Cepeda, Martínez, & Santa María, 2013) (MINVU, 2018). De este modo, es de esperar que al día de hoy muchas de estas viviendas no cumplan con estándares de aislamiento adecuados que permitan minimizar el consumo de energía o las emisiones de CO₂ al ambiente. En este universo de casos destacan las viviendas de las familias más vulnerables, las que muestran segregación social y emplazamientos distantes de los centros de las ciudades (Borsdorf, Hildalgo, & Vidal-Koppmann, 2016). Hogares que exhiben los peores estándares urbanos y cuyas viviendas, que pueden ir desde los 23m² a los 62m², no suelen refrigerarse en verano, pero sí suelen calentarse en invierno a pesar de tratarse de familias que perciben los menores ingresos de la sociedad (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Brain Valenzuela & Mora, 2010). Por consiguiente, es fundamental hacer de estas viviendas espacios más confortables térmicamente y más eficientes. En este contexto, las nuevas políticas energéticas para Chile buscan conseguir al año 2050 que la generación eléctrica provenga en gran parte de energías renovables (>70%) y, que el 100% de las nuevas edificaciones presenten altos estándares de construcción eficiente y cuenten con sistemas de control de energía (Ministerio de Energía, 2015). Sin embargo, a pesar de todos los avances existentes desde el 2000 en eficiencia energética y sustentabilidad en viviendas en Chile, existe poco impacto en lo normativo a nivel habitacional que propenda a ello (Blender, 2015).

Por otro lado, Chile está dentro del grupo de países que más produce madera, sin embargo, la construcción de viviendas en madera – generalmente de 1 o 2 pisos – es baja en relación a otras soluciones constructivas como lo es la albañilería en las regiones más pobladas (CDT, 2010) (Ugarte & Acevedo, 2016). En cuanto a las viviendas sociales, la madera se presenta como material predominante para la estructura de techumbre en todas las zonas térmicas, y se corrobora que su uso en muros solo predomina en las zonas térmicas con menor población (zonas 5, 6 y 7), pero que exhiben las condiciones climáticas más desfavorables (Bunster & Noguchi, 2015).

Investigaciones muestran que las viviendas sociales chilenas no presentan estándares de confort y eficiencia energética adecuados (Bustamante et al., 2013) (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Blender, 2015). Donde el uso de la albañilería, que presente menor resistencia térmica que un muro aislado estructurado en madera, se presenta predominante en las zonas térmicas con mayor población vulnerable del país (Zonas 1, 2, 3 y 4) (Bunster & Noguchi, 2015). Surge entonces la necesidad evidenciar los beneficios medioambientales y de confort térmico que brindaría el uso de muros estructurados en madera por sobre los muros de albañilería en viviendas sociales chilenas, sobre todo en aquellas zonas térmicas donde no prevalece su uso.

Conocido que la madera es un recurso disponible en Chile y que presenta ventajas medioambientales por sobre otros materiales de construcción, la presente investigación se cuestiona cuánto mejor resulta el uso de muros estructurados en madera por sobre la albañilería en una vivienda social que responda a la reglamentación térmica vigente en Chile. Para responder a esta interrogante se llevó a cabo un ACV simplificado, el que permitió contrastar indicadores de sustentabilidad y confort térmico para una vivienda unifamiliar estructurada con muros de madera y con muros de albañilería. Las modelaciones se realizaron en tres zonas climáticas donde la madera no predomina como material en la construcción de muros de viviendas sociales.

Al igual que en otros países menos desarrollados de la orbe, la aplicación de los ACV en edificaciones es relativamente reciente y los trabajos se han enfocado, principalmente, a incorporar el concepto de energía incorporada (Embodied Energy o EE) (Cárdenas, Muñoz, Riquelme, & Hidalgo, 2015) (Anand & Amor, 2017). Por consiguiente, la presente investigación busca ser aporte al conocimiento en este ámbito.

II. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN VIVIENDAS

En los ACV de las edificaciones se suele utilizar la estructura metodológica definida por la serie de normas ISO 14040 (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Estos análisis presentan diversas variaciones producto de las características inherentes a los edificios (materiales, ubicación geográfica, diseño, etc.), a diferencias detectadas en la definición de los aspectos que las estructuran y a la carencia de bases de datos ambientales (Anand & Amor, 2017) (Vilches, Garcia-Martinez, & Sanchez-Montañes, 2017). Pese a esto, siguen siendo útiles y aceptados internacionalmente para evaluar el desempeño ambiental de los edificios (Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Dossche, Boel, & De Corte, 2017).

Los ACV en viviendas suelen considerar la medición de las emisiones de los gases de efecto invernadero (Greenhouse Gas

o GHG), que definen el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential o GWP), y la energía demanda acumulada (Cumulative Energy Demand o CED) (Evangelista, Kiperstok, Torres, & Gonçalves, 2018)(Vilches et al., 2017). Varios autores han establecidos estructuras útiles y simplificaciones a los modelos con el propósito de sortear brechas de información, o bien, prescindir de las fases del ciclo de vida que presentan menor incidencia en las categorías de impacto GWP y CED (Zabalza Bribián, Aranda Usón, & Scarpellini, 2009). Estos modelos resultan lo suficientemente precisos para evaluar impactos ambientales y tomar decisiones respecto a cambios o rehabilitaciones en edificaciones (Vilches et al., 2017), pero para los cuales resulta importante establecer y transparentar el nivel de simplificación (Lewandowska, Noskowiak, Pajchrowski, & Zarebska, 2015).

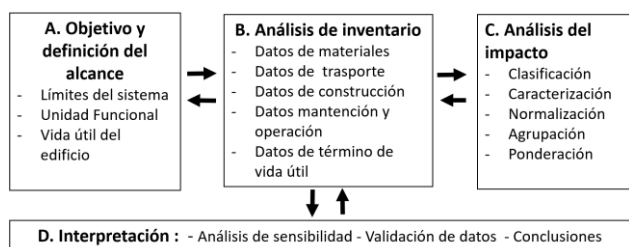


Fig. 1. Estructura para los ACV en edificaciones. Fuente: (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

Cada vez que se realiza un ACV se debe definir la estructura del análisis respectivo. La Fig. 1 muestra una estructura propuesta para el sector edificación a partir de la norma ISO 14040 y el estudio de varias publicaciones científicas. Los diferentes elementos que la estructuran, señalados con letras que van desde la “A” a la “D” en la Fig. 1, se explican brevemente en los siguientes apartados.

A. Objetivo y definición del alcance

Este elemento de la estructura considera tres definiciones necesarias: Los límites del sistema, la unidad funcional y la vida útil del edificio. Al igual que en otros productos, los límites del sistema pueden ir desde la cuna a la tumba (ver Fig. 2), desde la cuna a la puerta (para análisis de productos de construcción), o bien, desde la puerta a la puerta (para el análisis del proceso de construcción). En la mayoría de los casos el enfoque escogido va desde la cuna hasta la tumba (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Un ACV simplificado se caracteriza porque algunos de los elementos que deben abordarse en el ACV no son considerados, ya sea porque no son incidentes en las categorías de impacto ambiental que se estudian, o bien, porque son irrelevantes para los objetivos del análisis (Zabalza Bribián et al., 2009).

La unidad funcional define la unidad sobre la cual se cuantificarán los indicadores de impacto, en general, se suele

utilizar el metro cuadrado (m²) de área de piso (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Aunque también se ha visto que algunos ACV definen como unidad funcional la vivienda, sin embargo, esta unidad hace difícil el contraste de resultados entre investigaciones (Islam, Jollands, & Setunge, 2015).

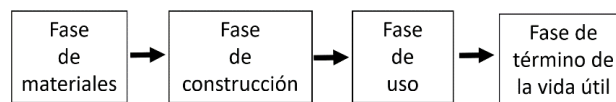


Fig. 2. Límites del sistema para los ACV en viviendas. Fuente: (Abd Rashid & Yusoff, 2015)(Oregi, Hernandez, & Hernandez, 2017).

En cuanto a la vida útil de los edificios, se suelen utilizar horizontes de 50 años para realizar los ACV. Sin embargo, existen investigaciones con horizontes de 80 y hasta 100 años (Islam et al., 2015) (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

B. Análisis de inventario

Este módulo considera la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas en las fases del ciclo de vida del edificio (Cabeza, Rincón, Vilariño, Pérez, & Castell, 2014). Por tanto, y conforme a la Fig. 1, este elemento asocia la búsqueda de datos vinculados a los materiales de construcción (¿Cuál es la energía incorporada en un ladrillo o m³ de madera aserrada?), a datos de transporte (¿Cuál es la magnitud de las emisiones contaminantes por cada km recorrido de camión?), a datos de construcción, operación y mantenimiento de los edificios (¿Cuál es la eficiencia de los equipos de construcción?, ¿Cuál es la magnitud de las emisiones contaminantes por cada kWh demandado por el edificio? ¿Cuál es la periodicidad de las mantenimientos o las rehabilitaciones en el edificio?, etc.), o bien, a datos relativos al término de vida útil de edificio (¿Qué proporción de materiales se recicla, se reutiliza o se bota?). Estos datos permitirán cuantificar las variables asociadas a los indicadores de impacto ambiental para las fases del ACV consideradas (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Debido a los numerosos materiales, procesos involucrados y la naturaleza dinámica de los edificios, este módulo corresponde al más complejo dentro de la estructura definida para los ACV en viviendas (Anand & Amor, 2017).

La fase de uso (ver Fig. 2) cobra gran importancia para el análisis de inventario, pues corresponde a la fase más incidente en el ACV de las edificaciones. Siendo las menos incidentes, las fases de construcción y de término o desuso del edificio, las que además pueden presentar falta de información, datos difíciles de encontrar, datos poco precisos, o bien, datos confidenciales (Anand & Amor, 2017; Abd Rashid & Yusoff, 2015; Zabalza Bribián et al., 2009; Islam et al., 2015). Este inconveniente puede eludirse a partir del uso de programas computacionales como lo son SimaPro, ATHENA, GaBi, entre

otros (Islam et al., 2015; Zabalza Bribián et al., 2009; Cabeza et al., 2014). Sin embargo, estos programas requieren bases de datos de inventario específicas a cada región. Las que no están disponibles para Chile, e incluso para Sudamérica, lo que se ha sorteado en otras investigaciones a partir del uso de bases de datos internacionales contextualizadas a la realidad chilena (Oyarzo & Peuportier, 2014; Cárdenas et al., 2015; Lewandowska et al., 2015).

C. Análisis del impacto

La asociación de los datos inventariados con las categorías de impacto seleccionadas (GWP, GHG, CED, eutrofización, uso del suelo, uso del agua, acidificación, residuos sólidos, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos, contaminación del aire o del agua, entre otros) y el cálculo resultante de los indicadores de estas categorías caracterizan a este paso (Evangelista et al., 2018) (Islam et al., 2015). Dos métodos existen para realizar la evaluación de impacto, los orientados al problema (midpoint) y los orientados a los daños (endpoint) (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Los puntos medios (midpoints), frecuentes en los ACV en viviendas, son considerados un punto en la cadena causa-efecto de una categoría de un impacto particular antes del punto final (endpoint), por ejemplo, las categorías GWP y cambio climático corresponden a puntos medio y final respectivamente (Abd Rashid & Yusoff, 2015)(Bovea & Powell, 2016)(Ismaeel, 2018).

D. Interpretación

Una vez obtenidos los indicadores para los impactos que han sido caracterizados en el ACV de la vivienda, estos son interpretados conforme a los objetivos que han sido definidos para evaluar la edificación. Esta interpretación permite, conforme a la Fig. 1, aportar a la toma de decisiones, destacar oportunidades de mejoras en el desempeño ambiental de un edificio, o bien, concluir en torno a los impactos de los materiales o de los subsistemas de construcción en el edificio (Evangelista et al., 2018) (Cabeza et al., 2014). En esta etapa se validan resultados comparándolos con otras investigaciones publicadas y realizando análisis de sensibilidad para evaluar la confiabilidad de las bases de datos no locales (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

III. METODOLOGÍA

La presente investigación adoptará un ACV simplificado a partir de un enfoque midpoint. Se determinarán los indicadores de impacto ambiental para las categorías GWP y CED, el primero medido en kgCO_2eq y, el segundo, medido en kWh. Para analizar las condiciones de confort térmico se determinará

el tiempo no confortable en horas (TNC) basado en la ASHRAE 55-2004.

La tabla I recoge los elementos que en general se listan, por cada fase, conforme a diversas investigaciones en torno al ACV en edificaciones. (Oregi et al., 2017)(Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Zabalza Bribián et al., 2009). En ella se pueden evidenciar qué elementos serán recogidos y cuáles no, donde los elementos asociados a la fase de término de la vida útil de la vivienda no serán abordados debido a la carencia de datos específicos para Chile (Oyarzo & Peuportier, 2014) y debido a la menor incidencia que presenta dicha fase en las categorías de impacto GWP y CED (Islam et al., 2015).

Las principales fuentes de información consultadas para llevar a cabo la investigación se muestran en la cuarta columna de la tabla I. Estas se asocian por fila a cada uno de los elementos que serán considerados en el ACV simplificado, entre ellas destacan las declaraciones ambientales de productos o EPD (Environmental Product Declaration) que algunas empresas chilenas publican en la Internet, bases de datos contextualizadas desde Ecoinvent o GaBi que destacan por su integridad y facilidad de uso para analizar los materiales de construcción (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016), información proveniente de normativa chilena (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones - OGUC) e informes técnicos derivados de instituciones públicas o privadas tales como la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción.

Consecuentemente, y en congruencia la tabla I, la Fig. 3 muestra el flujograma para determinar los indicadores de sustentabilidad dentro de las categorías de impacto de interés (GWP y CED) y el tiempo no confortable en horas (TNC) basado en la ASHRAE 55-2004. El contraste de estos indicadores, para tres zonas climáticas en Chile, permitirá evaluar el desempeño ambiental de la vivienda de estudio frente al cambio de materialidad propuesta para los muros de envolvente.

A. Descripción del caso de estudio

Para los propósitos de este estudio se tomó como referencia una vivienda social unifamiliar, materializada en albañilería armada, planta de $50,5\text{m}^2$ y volumen de calefacción igual a $121,2\text{m}^3$. Las Fig. 4 y Fig. 5 muestran la planta de la vivienda y la elevación de uno de sus muros perimetrales estructurado en albañilería armada. Los muros, que descansan sobre una fundación de hormigón corrido, son reforzados con vigas y sobrecimientos de hormigón armado, algo necesario en un país altamente sísmico (Camus, Arenas, Lagos, & Romero, 2016). La vivienda da cumplimiento al cuadro normativo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU) y, responde a una tipología y diseño habituales para viviendas

TABLA I
ELEMENTOS CONSIDERADOS EN LOS ACV SIMPLIFICADO PARA LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

Fases conforme a Fig.2	Elementos generalmente considerados en los ACV de edificaciones por fase	Elementos incorporados en el ACV	Fuentes de información y justificación de la no inclusión en el ACV
Fase de materiales o productos	Suministro de materias primas	SI	Se usaron datos de inventario ambiental de materiales de construcción de producción chilena (EPD). Frente a la inexistencia información se utilizó literatura o bases de datos internacionales (Ecoinvent, GaBi, otras) contextualizadas a la realidad chilena. Para la mensura y caracterización de los materiales se utilizaron las especificaciones técnicas y los planos de arquitectura, estructura y especialidades de la vivienda de estudio.
	Transporte	SI	
	Manufactura de productos	SI	
Fase de construcción	Transporte de materiales	SI	Se usaron distancias promedio a los proveedores y bases de datos chilenas para determinar la energía consumida en las operaciones de transporte de materiales y construcción, algunas bases que se utilizaron provienen de la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción y del Manual Chileno de Costos, Materiales y Actividades para la Construcción.
	Transporte de maquinarias	SI	
	Energía consumida durante el proceso de construcción	SI	
Fase de uso	Energía consumida en la generación de condiciones de confort térmico	SI	Se modeló la vivienda en 3D y se determinaron los requerimientos de energía con la ayuda del programa de simulación energética EnergyPlus (https://energyplus.net/) a partir del uso de la interface Euclid para SketchUp.
	Energía consumida por equipos y luminaria	NO	
	Energía consumida para calentar agua	NO	
	Uso operativo del agua	NO	
	Mantenimiento	NO	
Fase de término de la vida útil	Reparaciones, reemplazos o rehabilitación	NO	No se incluyeron debido a su baja incidencia en las categorías de impacto GWP y CED que abordan los ACV en edificaciones (Islam et al., 2015) y debido a la carencia de información específica para Chile (Oyarzo & Peuportier, 2014).
	Deconstrucción o demolición	NO	
	Transporte	NO	
	Reciclaje	NO	
	Reutilización	NO	
	Vertedero	NO	

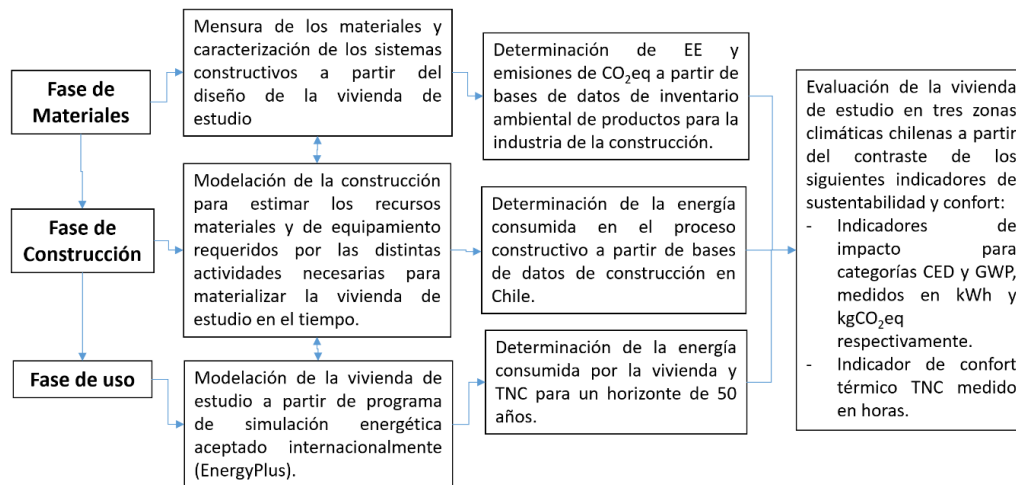


Fig. 3. Flujo metodológico para la obtención de los indicadores de evaluación ambiental y confort térmico.

sociales, las que cuentan con un baño, una cocina, dos dormitorios y un living comedor (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Bustamante et al., 2013). La techumbre está estructurada en madera de pino, tipología que prevalece en las viviendas sociales chilenas (Bunster & Noguchi, 2015).

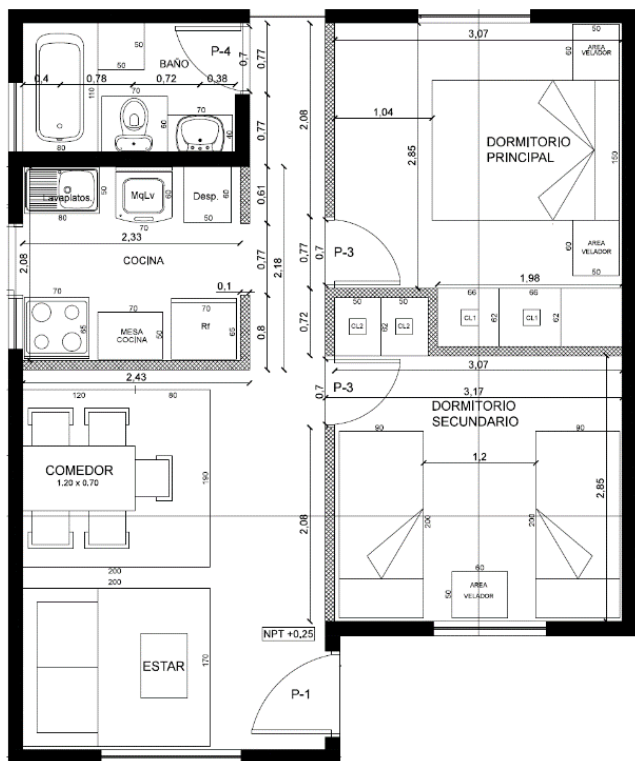


Fig. 4. Planta de la vivienda de estudio, muros achurados en negro corresponden a la albañilería y en color claro a la tabiquería interior.

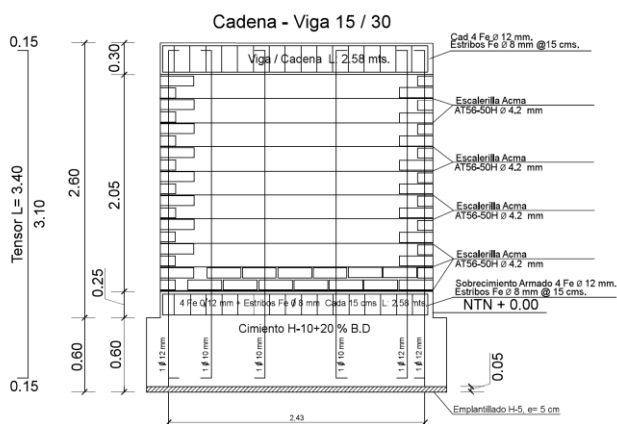


Fig. 5. Elevación estructural de un muro de albañilería en la vivienda de estudio.

La vivienda que se muestra en las Fig. 4 y Fig.5 corresponden a la vivienda base para el estudio, la que se ha denominado VMA (vivienda con muro de albañilería). Su propuesta de cambio se ha denominado VMM (vivienda con muro

estructurado en madera). Ambas soluciones se especifican en el “Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico” con los códigos 1.2M.B9.1 y 1.2.M.C8 respectivamente (MINVU, 2014). La tabla II muestra, para ambos casos, las principales características técnicas de los subsistemas en la vivienda.

B. Aplicación del ACV simplificado

Conforme a lo establecido en la tabla I y en la Fig. 3, se tiene:

1) Objetivo y definición del alcance

El objetivo del ACV fue evaluar el desempeño ambiental de los modelos VMA y VMM, con énfasis en la calefacción de los espacios habitacionales, en tres zonas climáticas donde el uso de la albañilería predomina sobre la madera. Para esto se han tomado de referencia las ciudades de Antofagasta (ubicada en la Zona térmica Z1), Santiago (ubicada en la Zona térmica Z3) y Concepción (ubicada en Zona la térmica Z4). La unidad funcional fue el metro cuadrado de área de construcción, el horizonte de análisis 50 años y las categorías de impacto ambiental seleccionadas para la evaluación fueron GWP y CED. Además, en la fase de uso se consideró la determinación del TNC.

2) Análisis de inventario

En la fase de materiales o productos, se miden todos los elementos constituyentes de la vivienda y las necesidades de transporte al sitio de construcción. Esta cuantificación inició por los elementos constructivos presentes en las viviendas tipos VMA y VMM (m² de ventanas, m³ de cimientos de hormigón, m² de albañilería o tabiquería en madera, etc.). Luego se determinaron los kilogramos de material de construcción realmente consumidos en los procesos constructivos. Esto a partir de la definición de rendimientos para las operaciones de construcción, para lo que se consideraron pérdidas que van entre un 5% y 15% dependiendo de la partida constructiva. Los materiales que presentan diferencias de mensura están asociados a los elementos o subsistemas que varían entre VMA y VMM. Conforme a la tabla II, no solo los muros cambian, sino también las fundaciones, principalmente, debido a que el modelo VMM resulta más liviano. Producto de esto, los materiales hormigón, acero de construcción, poliestireno expandido, ladrillos, madera, yeso cartón, fibrocemento, mortero y estucos, presentes en muros o fundaciones, fueron los materiales que presentaron las principales diferencias entre los casos VMA y VMM (Ver tabla III). Por otro lado, materiales tales como, lana de roca, aluminio, vidrio, cerámicas, PVC, cobre, acero galvanizado, entre otros, fueron materiales que se supusieron constantes para los casos VMA y VMM. Los que se muestran como “Otros materiales” en la tabla III.

TABLA II
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ELEMENTOS EN LA VIVIENDAS VMA Y VMM

Elementos en la vivienda	VMA	VMM
Ventanas (6,88m ²)	Ventanas con transmitancia térmica (U) igual a 5,8 W/m ² °C, las que presentan un vidrioado monolítico de 3mm de espesor y marcos de aluminio.	Igual a VMA
Muros (57,03m ²)	Muros de albañilería armada con ladrillos de ladrillo hecho a máquina de 329mmx154mmx94mm, unidos con mortero de dosificación 1:3 en volumen y de espesor 15 mm +/- 3 mm. Solución corresponde a codificación 1.2.M.B9.1 listado oficial soluciones constructivas del Ministerio de Vivienda y Urbanismo en Chile (MINVU). U = 1,7 W/m ² °C.	Muro-tabique con aislación térmica de poliestireno expandido de espesor 50mm y densidad 10 kg/m ³ en el núcleo del tabique. El elemento está formado por una estructura de madera hecha con listones de pino radiata de 2"x3" cepillado. Estructura revestida interiormente con placa de yeso cartón de 12,5mm de espesor y exteriormente con placa de fibrocemento de 5mm de espesor. Solución corresponde a codificación 1.2.M.C8 del listado oficial de soluciones constructivas del MINVU. U=0,73 W/m ² °C
Puertas (4,5m ²)	Puertas estructuradas en madera de pino con U=3 W/m ² °C	Igual a VMA
Estructura de techo y cielo (50,5m ²)	Cerchas de madera de pino, cubierta de acero galvanizado y cielo estructurado en entramado de madera cubierto con placa de yeso catón y aislado con lana de roca que presenta un U=0,47 W/m ² °C	Igual a VMA
Fundaciones y piso (50,5m ²)	Zapata corrida de hormigón y sobrecimiento de HA, radier de hormigón de 8cm con cerámica en zonas húmedas y solo afinado en resto de la vivienda. U= 4,5 W/m ² °C promedio.	Zapata aislada y cadena de fundación, radier de hormigón de 8cm con cerámica en zonas húmedas y solo afinado en resto de la vivienda. U= 4,5 W/m ² °C promedio.

TABLA III
MENSURA DE LOS MATERIALES PRESENTES EN LAS VIVIENDAS VMA Y VMM

Material	Mensura en (kg)	
	VMA	VMM
Hormigón	37056	20562
Acero construcción	583	166
Poliestireno expandido	26	56
Ladrillos	8023	0
Madera	1785	2826
Morteros o estucos	7876	690
Yeso Cartón	988	1631
Fibrocemento	0	293
Otros materiales	679	679

Las cantidades mensuradas, conforme a las fuentes de información establecidas en la tabla I, fueron multiplicadas por los factores o coeficientes de paso respectivos, ya sea para el estudio de los materiales (MJ/kg y kgCO₂eq/kg), o bien, para el estudio de los sistemas constructivos (MJ/m² y kgCO₂eq/m²,

por ejemplo, para una ventana o una tabiquería) (Ver Fig. 6). Cabe destacar que para la madera se consideraron las emisiones derivadas de su ciclo industrial y no se incluyó el carbono biogénico contenido en ella por considerarlo carbono neutro (Kuittinen & Linkosalmi, 2015).

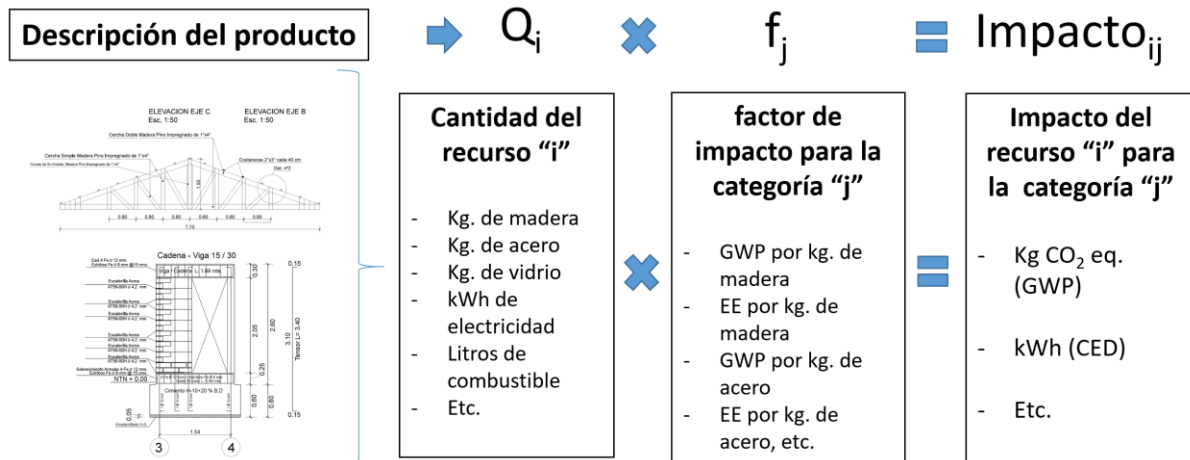


Fig. 6. Determinación del impacto por categoría de interés (Gregory, 2017).

En la definición de las características físicas de los materiales (densidades, conductividades térmicas, calor específico, entre otras) se consideraron, en orden de prevalencia, las definidas por los fabricantes de materiales, la normativa chilena, o bien, las definidas por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Estas últimas disponibles en la biblioteca de datos para materiales de construcción dentro del programa de simulación energética EnergyPlus.

En la fase de construcción se procede de manera análoga que en la fase previa. Se identificaron los recursos necesarios para materializar los casos VMA y VMM, luego se cuantificaron los recursos energéticos derivados del transporte, del uso de herramientas, maquinarias o equipos y, los recursos materiales asociados a estructuras auxiliares o temporales necesarios para la construcción (se supusieron 3 usos y madera). Para esto se generó un programa de construcción para VMA y VMM, donde a cada actividad constructiva en el tiempo se asociaron los recursos demandados para la construcción.

Con respecto al transporte de materiales a obra, se definió un camión diésel de capacidad 9 toneladas y rendimientos de 6km/l cargado y 10km/l vacío. Se ha estimado una distancia promedio de 20km entre el sitio de construcción y los diferentes proveedores de materiales o productos de construcción, los que se sabe varían respecto al tipo de material o producto que se movilice (Evangelista et al., 2018). Estas distancias se supusieron análogas para las diferentes ciudades, puesto que corresponden a capitales regionales con centros de provisión de materiales que podrían suponerse comunes. Dada la estimación de los viajes necesarios en el tiempo, donde se supuso un transporte cargado y otro vacío, el total de kilómetros de transporte para la vivienda VMA y VMM fueron de 520km y 400km respectivamente.

Determinada la cantidad de combustible y energía demanda, se determinaron las emisiones contaminantes a partir de los coeficientes de paso respectivos. Para electricidad se utilizó el promedio del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) igual a 0,4187 kgCO₂eq/kWh (Comisión Nacional de Energía, 2018) y para gas licuado de petróleo (LPG) y diésel los coeficientes 0,2272 kgCO₂eq/kWh y 0,2667 kgCO₂eq/kWh respectivamente (Ministerio de Energía, 2018).

En la fase de uso, la vivienda y sus variaciones fueron modeladas en el programa de simulación energética EnergyPlus versión 8.6, el cual es uno de los programas de simulación más completos y aceptados internacionalmente para modelar viviendas (Sousa, 2012). La Fig. 7 muestra la vivienda modelada en SketchUp utilizando la interface Euclid para EnergyPlus. Los casos VMA y VMM fueron modelos suponiendo los elementos, materialidades, superficies y transmitancias térmicas que se muestran en la tabla II, algunos supuestos para la modelación son una tasa de renovación de aire promedio de 1,5 renovaciones por hora, temperatura de confort 20°C, 4 usuarios y entretecho ventilado.

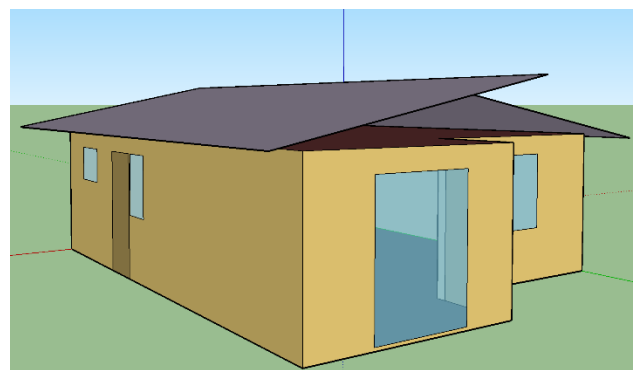


Fig. 7 Modelación tridimensional de la vivienda para simulación energética con EnergyPlus.

TABLA IV
ESPECIFICACIÓN DE ZONAS Y ARCHIVOS CLIMÁTICOS PARA LA MODELACIÓN EN ENERGYPLUS

Ciudad	Archivo de clima EnergyPlus	latitud (grados)	longitud (grados)	elevación (m)	límites grados día
Antofagasta (Z1)	CHL IWEC Data WMO#=854420	-23,4	-70,4	120	<500
Santiago (Z3)	CHL IWEC Data WMO#=855740	-33,4	-70,8	476	750 - 1000
Concepción (Z4)	CHL IWEC Data WMO#=856820	-36,8	-73,0	16	1000 - 1250

TABLA V
FACTORES DE EMISIÓN ESTIMADOS A PARTIR DEL TIPO DE ENERGÍA PARA CALEFACCIONAR

Ciudad	Gas licuado	Electricidad	Leña o derivados de la madera	Kerosene	Factor de emisión (kgCO ₂ eq/kWh)
Antofagasta (Z1)	40,0%	2,6%	31,6%	25,8%	0,2565
Santiago (Z3)	56,3%	6,2%	9,5%	28,0%	0,2730
Concepción (Z4)	14,4%	0,6%	74,2%	10,8%	0,2310

La tabla IV muestra las zonas climáticas para las cuales fueron modelados los casos VMA y VMM. Se obtuvieron promedios de energía demanda en kWh/m² al año para cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste). De igual modo se obtuvo el tiempo no confortable en horas (TNC), basado en el estándar ASHRAE 55-2004 para 8760 horas anuales de simulación energética.

En la determinación de las emisiones contaminantes derivadas de la calefacción, se consideró el tipo de equipo y tipo de combustible para calefaccionar en las diferentes zonas climáticas. Para responder a esto, se determinaron los factores de emisión que se detallan en la tabla V, donde el gas licuado y la leña predominan en las ciudades de Antofagasta y Concepción, y el gas licuado y el kerosene en la ciudad de Santiago (CDT, 2015). En la determinación de estos factores se tomaron de referencia los estudios “El dilema de la leña, ¿cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción?” (Reyes, Nelson, Navarro, & Retes, 2015) y “Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera” (CDT, 2015). Estudios que referencian la distribución de los sistemas de calefacción utilizados en las diferentes zonas climáticas chilenas, sus rendimientos y los factores de emisión por tipo de combustible.

IV. RESULTADOS

En la fase de materiales se identificaron, entre otros, los siguientes materiales para VMA o VMM: hormigón, acero de construcción, lana de roca, poliestireno expandido, aluminio, cerámica, ladrillos, madera, morteros y estucos, pinturas, PVC, yeso cartón, vidrio, acero galvanizado, cobre, fibrocemento, fieltro asfáltico, plástico y pinturas. El total de EE en las

viviendas tipo VMA y VMM ascendió a 33812kWh y 22991kWh respectivamente. El total de GHG en las viviendas tipo VMA y VMM ascendió a 11273 kgCO₂eq y 7257 kgCO₂eq respectivamente.

En la Fig. 8 se individualizan los materiales asociados a los elementos constructivos, muros y fundaciones, que presentaron las principales diferencias en los casos VMA y VMM (ver Fig. 9). Dentro de los materiales no individualizados, agregados a “otros materiales” en la Fig. 8, destacan la lana de roca en el cielo, el PVC en las canalizaciones, el acero galvanizado en la cubierta y el aluminio en las ventanas. Estos materiales sumados, supuestos constantes en los modelos VMA y VMM, ascendieron a 4479kWh y 1039kgCO₂eq para la EE y los GHG respectivamente. Los resultados por tipo de elemento en la vivienda, se muestran en la Fig. 9.

En la fase de construcción la energía demanda en VMA y VMM ascendieron a 1878 kWh y 1529 kWh respectivamente. Por otro lado, las emisiones contaminantes asociadas a esta fase ascendieron a 583 kgCO₂eq y 481 kgCO₂eq para VMA y VMM respectivamente. Estos resultados por tipo de recurso demandado se muestran en la Fig. 10.

En la fase de uso, la vivienda VMA mostró para Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) una demanda de energía anual para calefaccionar iguales a 48,43kWh/m², 104,55kWh/m² y 110,94kWh/m² respectivamente. Para el caso VMM esta demanda ascendió a 48,19kWh/m², 96,67kWh/m² y 101,07kWh/m² al año para cada ciudad respectivamente. Esta demanda de energía y las emisiones contaminantes para un horizonte de 50 años, conforme a los coeficientes de paso mostrados en la tabla V, se muestran en la Fig. 11.

Los resultados para el TNC se muestran en la Fig. 12. En ella se muestran los resultados promedios que arrojó el

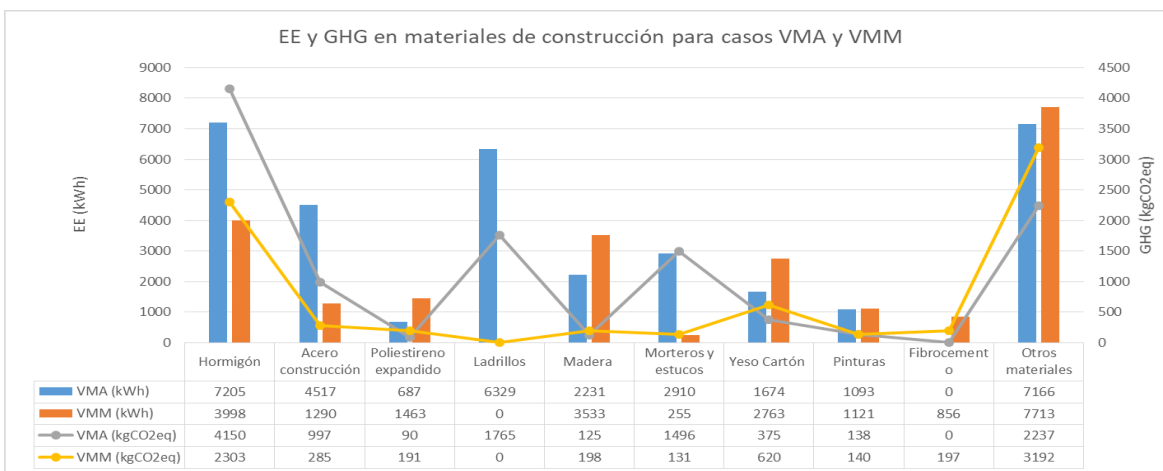


Fig. 8. Cargas ambientales de los materiales presentes en las viviendas VMA y VMM.

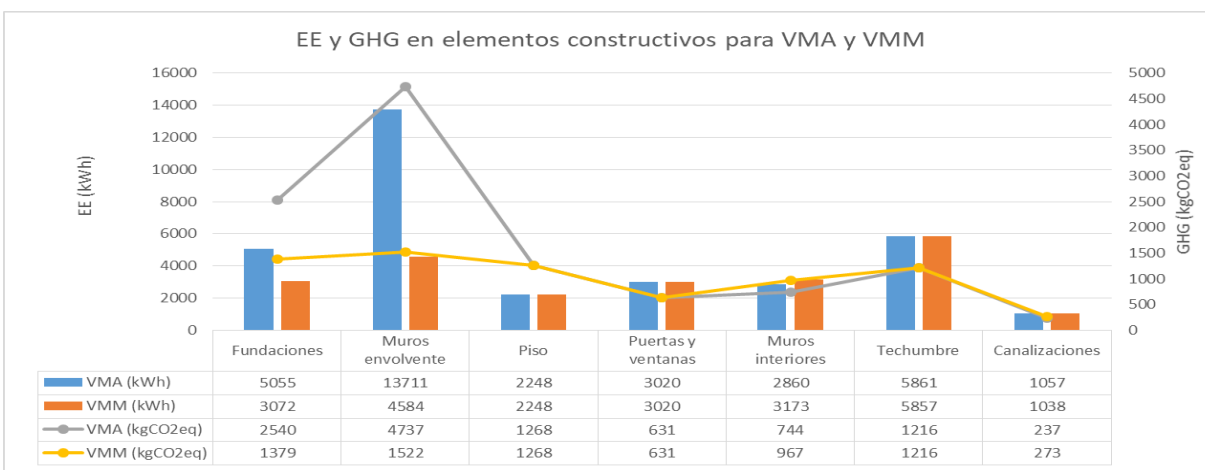


Fig. 9. Cargas ambientales de los elementos o subsistemas presentes en VMA y VMM.

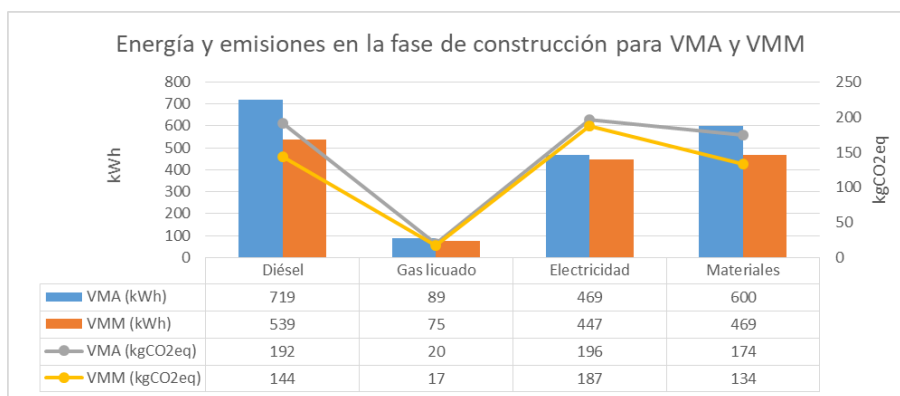


Fig. 10. Cargas ambientales de los principales recursos usados durante la construcción de las viviendas VMA y VMM.

programa de simulación EnergyPlus cuando las viviendas VMA y VMM fueron modeladas para cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste) por zona climática (Antofagasta,

Santiago y Concepción). En la Fig. 12 también se aprecia la fracción del TNC, por tipo de vivienda y ciudad, para un total de 8760 horas modeladas en EnergyPlus.

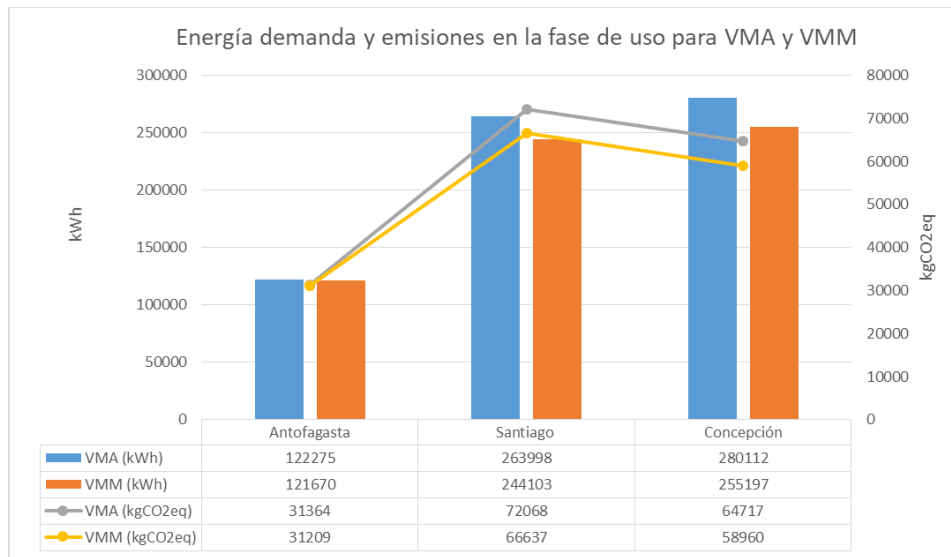


Fig. 11. Cargas ambientales en la fase de uso para casos modelados VMA y VMM.

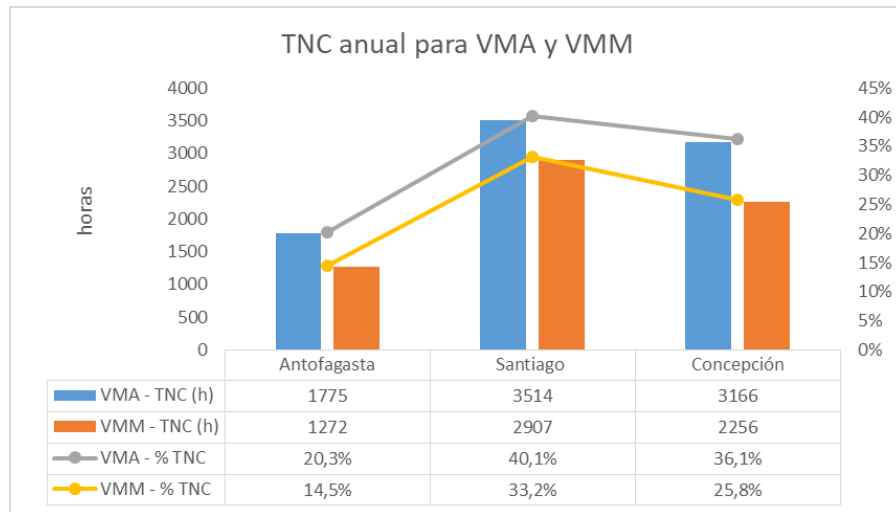


Fig. 12 Horas y proporción de tiempo no confortable para casos modelados VMA y VMM.

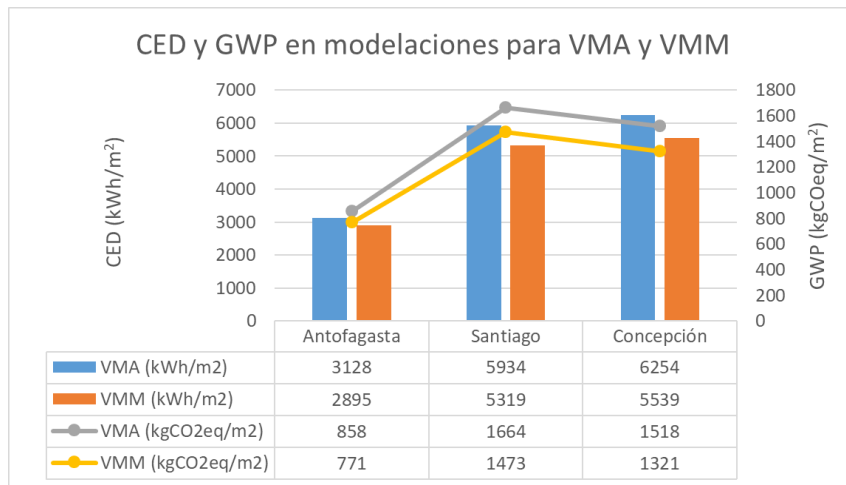


Fig. 13. CED y GWP por m² para los casos modelados VMA y VMM.

Conforme a los resultados en las fases de materiales, de construcción y de uso, la Fig. 13 muestra los indicadores de impacto ambiental, por unidad funcional (m^2), para las categorías CED y GWP conforme ha sido planteado en el objetivo y alcances para el ACV de las viviendas modeladas.

Finalmente, conforme a los resultados previos, las Fig. 14 y Fig. 15 muestran las incidencias de las fases de materiales, de construcción y de uso para las categorías de impacto CED y GWP.

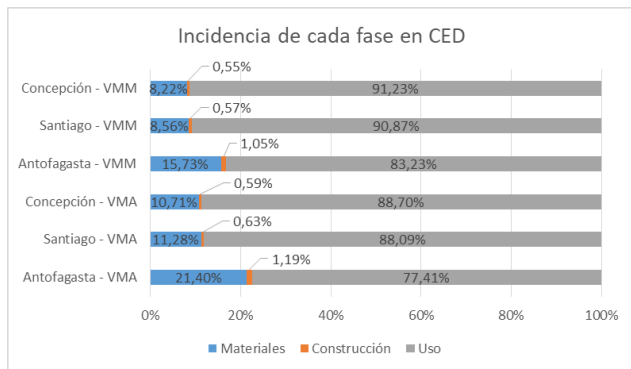


Fig. 14. Incidencia de las fases del ACV en la categoría CED.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El hormigón, el acero de construcción, el acero galvanizado, los ladrillos, el yeso cartón y los morteros y estucos resultaron ser los materiales más incidentes en la etapa de materiales para VMA. Estos materiales representaron el 73,9% de la EE y el 81,8% de los GHG en la vivienda. En cuanto al modelo VMM, el hormigón, el acero de construcción, el acero galvanizado, el poliestireno expandido, la madera, las pinturas y el yeso cartón, resultaron ser los materiales con mayor incidencia en la EE, representado 71,8% del total de EE en la vivienda. Sin embargo, este conjunto de materiales solo representó el 58,6% de los GHG, pues la madera presenta alta energía incorporada en relación a sus emisiones contaminantes (Ver Fig. 8).

En el modelo VMM, los GHG para el acero de construcción, la lana de roca, el poliestireno expandido, el aluminio, el fibrocemento y los morteros o estucos promediaron, con baja dispersión, el valor resultante para los GHG en la madera. Reflejando una distribución más uniforme y una menor carga ambiental de los materiales cuando se modeló la vivienda social con muros estructurados en madera. Esto se evidencia al observar la distribución de las cargas ambientales en los elementos constructivos para las viviendas modeladas en la Fig. 9. En consecuencia, cuando el muro de albañilería es reemplazado por el muro estructurado en madera, la EE y los GHG caen en 32% y 36% respectivamente.

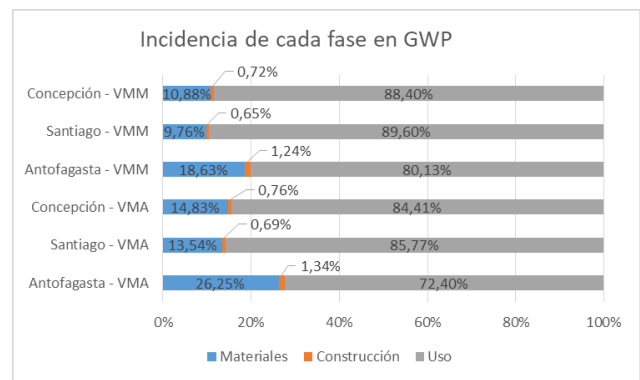


Fig. 15. Incidencia de las fases del ACV en la categoría GWP.

Los resultados previos no consideran el potencial uso de la madera en otros elementos constructivos (marcos en ventanas, por ejemplo), como tampoco los beneficios de su uso en todo el ciclo de vida de la vivienda, pues la madera – además de presentar una carga que puede ser considerada neutra –, también puede considerarse un carga negativa derivada del efecto positivo del secuestro permanente del carbono biogénico o de su reutilización como combustible en sustitución de otro en la etapa de desecho (efecto sustitución) (Kuittinen & Linkosalmi, 2015) (Fouquet et al., 2015). Consideraciones de este tipo para el uso de la madera en la vivienda, han llegado a representar una carga negativa de hasta 5,5% para los GHG en la fase de desecho o desuso (Islam et al., 2015).

Los GHG derivados de la fase de materiales para VMA y VMM resultaron ser 223,2 $kgCO_2eq/m^2$ y 143,7 $kgCO_2eq/m^2$ respectivamente. Lo que es congruente con investigaciones previas que muestran para viviendas en albañilería valores entre 161 $kgCO_2eq/m^2$ y 393,1 $kgCO_2eq/m^2$ y, para viviendas estructuradas en madera, valores entre 128 $kgCO_2eq/m^2$ y 830 $kgCO_2eq/m^2$ (Chastas, Theodosiou, Kontoleon, & Bikas, 2018). La mayor dispersión en estas últimas podría asociarse a los variados productos madereros existentes y a los múltiples escenarios posibles de considerar para determinar la carga ambiental de la madera (carbón secuestrado, efecto sustitución, otros) (Martínez-Rocamora et al., 2016) (Kuittinen & Linkosalmi, 2015).

La albañilería corresponde al subsistema constructivo con mayor impacto en las viviendas modeladas, más del doble respecto del subsistema que le sigue (ver Fig. 9). Este valor se presenta mayor que en otras investigaciones con muros de albañilería (Rossi, Marique, Glaumann, & Reiter, 2012). Esto debido que a la albañilería modelada se han incorporado elementos de refuerzo en acero u hormigón armado, lo que es frecuente en un país altamente sísmico (Ver Fig. 5). En términos generales, y conforme a la Fig. 9, los muros (exteriores e interiores), la techumbre y las fundaciones representan, en

ambos casos modelados, aproximadamente el 81% de la EE y 71% de las GHG, lo que al igual que en otras investigaciones, evidencia la importancia de estos subsistemas en la fase de producto y su consideración al momento de diseñar edificios sustentables (Zabalza Bribián et al., 2009)(Rossi et al., 2012) (Islam et al., 2015).

La energía demandada y los GHG en la fase de construcción también se presentaron mejores en el modelo VMM. Así, cuando se plantea el reemplazo de la albañilería por los muros estructurados en madera, la energía demanda y los GHG caen en 19% y 17% respectivamente. Estas diferencias se explican, principalmente, a que el modelo VMM prescindía de algunos elementos temporales para la construcción, presentaba un menor plazo de construcción y menores requerimientos al transporte debido a que los materiales en VMM resultaron más livianos (ver tabla III, aproximadamente un 50% menos de masa). Pese a esto, y conforme a los resultados planteados en las Fig. 14 y Fig. 15, estas disminuciones no son significativas a nivel global.

Las demandas de energía para calefaccionar las viviendas VMA y VMM, modeladas para las diferentes zonas térmicas estudiadas, se mostraron congruentes con investigaciones previas para viviendas sociales en Chile (Bustamante et al., 2013)(Cárdenas et al., 2015). Los resultados superaron ampliamente los 15kWh/m² en todos los casos modelados. Por tanto estos diseños, que cumplen con la normativa vigente para las zonas estudiadas (Z1, Z3 y Z4) (MINVU, 2018), no responden a los estándares de eficiencia energética perseguidos para las viviendas nuevas en Chile. Corroborando lo planteado por otros investigadores en el pasado (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Blender, 2015).

Conforme a la Fig. 11, las demandas de energía para calefaccionar se presentaron más favorables en la vivienda VMM, pero más significativas en las ciudades con mayor cantidad de Grados-Día, es decir, en las ciudades de Santiago (Z3) y Concepción (Z4). De este modo, los GHG – proporcionales a las demandas de energía conforme a los factores de emisión en tabla V– mostraron disminuciones de 0,5%, 7,5% y 8,9% cuando se reemplazó la albañilería por muros estructurados en maderas en las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Pareciera que existe indiferencia entre la albañilería y el muro estructurado en madera para la vivienda en Antofagasta, sin embargo, esto es efectivo solo considerando calefacción y no refrigeración, pues se presentaron diferencias importantes en Antofagasta cuando se analizó el TNC.

Al analizar el confort térmico cuando fue reemplazado el muro de albañilería por el estructurado en madera en la vivienda social, es decir, considerando las necesidades de calefacción y refrigeración, se aprecia en la Fig. 12 que TNC disminuyó 28%,

17% y 29% en las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Estos valores son especialmente importantes considerando la incidencia de la fase de uso en las categorías de impacto CED y GWP (Ver Fig. 14 y Fig. 15) y el aumento gradual de las temperaturas en el mundo que demandarán en el futuro mayores necesidades de confort para enfriamiento y menores para calefacción, especialmente en viviendas con climas más cálidos como es el caso de Antofagasta (Yang, Yan, & Lam, 2014).

En conformidad a los análisis previos, y a los resultados que se muestran la Fig. 13, las categorías de impacto ambiental CED y GWP se mostraron más favorables para VMM en todas las ciudades analizadas. Las disminuciones en la categoría de impacto CED resultaron iguales a 7,5%, 10,4% y 11,4% para las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Por otro lado, las disminuciones en la categoría de impacto GWP resultaron iguales a 10,1%, 11,5% y 13% para las mismas ciudades respectivamente. Diferencias que se esperan sean mayores si también fuesen incorporados los requerimientos de refrigeración. Los resultados denotan que a mayores exigencias climáticas (mayores Grados-Día), mayores serán las diferencias esperadas entre los modelos VMA y VMM, justificando así el predominio de la vivienda social estructurada con muros de madera en las zonas térmicas Z5, Z6 y Z7 de Chile (Bunster & Noguchi, 2015).

Al analizar las incidencias de cada fase en las categorías de impacto CED y GWP (ver Fig. 14 y Fig. 15), se aprecia que la fase de uso es la más incidente y que la fase de construcción es la menos incidente en todos los casos modelados. Lo que es congruente con lo establecido por la bibliografía y con los resultados de ACV en viviendas chilenas (Cárdenas et al., 2015)(Oyarzo & Peuportier, 2014)(Muñoz, Zaror, Saelzer, & Cuchí, 2012). Ahora bien, la bibliografía establece que en viviendas altamente eficientes, cuando se analiza la categoría de impacto CED, la incidencia de la fase de materiales se acerca a la de uso (Cabeza et al., 2014) (Gregory, 2017). Esto se evidencia al suponer un consumo en calefacción igual a 15kWh/m² al año para los casos analizados, que al dejar constante la EE (supone incorporar materiales más eficientes con igual EE en la vivienda), se obtienen incidencias para la fase de uso en la categoría CED que van entre 51,5% y 60,7%.

Cabe destacar que los impactos ambientales medidos en las viviendas son sensibles a las variaciones en los coeficientes de emisiones asociados a la energía y a los materiales de construcción (Chastas et al., 2018)(Dixit, 2017). En este contexto, la presente investigación debió contextualizar algunos factores de emisión importes para el estudio, como fue el caso de la madera, pues en Chile la industria maderera se está abriendo a desarrollar EPD para sus productos, sin embargo,

aún no hay resultados concretos al respecto (Wotherspoon, 2018).

A pesar de que no se estudiaron los costos de las soluciones constructivas, se podría decir que la diferencia de costos por m² entre los tipos de muros abordados no es muy alta (Ondac, 2018). Además, debido a que la vivienda de albañilería es más pesada, la vivienda en madera presenta una reducción de sus fundaciones y, por tanto, una reducción de costos.

Finalmente, reiterar que los resultados que se presentan en esta investigación corresponden a una vivienda social unifamiliar, por lo que se espera que los impactos ambientales medidos en las categorías CED y GWP sean menores cuando se trate de viviendas sociales pareadas o colectivas (Evangelista et al., 2018).

VI. CONCLUSIONES

Los indicadores medioambientales para las categorías de impacto CED y GWP se mostraron mejores para la vivienda estructurada con muros de madera. Las diferencias favorables aumentarían si las viviendas sociales también se refrigeraran, lo que se evidencia en las mejoras significativas de confort térmico cuando se mide el TNC.

La mejoras del TNC en las viviendas modeladas se consideran importantes debido al aumento gradual de las temperaturas en el mundo y, por tanto, a las mayores necesidades de refrigeración que éstas presentarán en el futuro (Yang et al., 2014).

La carga ambiental en la fase de materiales cae significativamente para la vivienda estructurada en madera, pudiéndose decir con relativa precisión que los indicadores ambientales analizados en esta fase cae en aproximadamente un tercio – 32% y 36% para EE y GHG respectivamente – cuando se opta por la solución con muros estructurados en madera.

Se confirma lo señalado por la literatura respecto a las incidencias de las fases analizadas en las categorías de impacto ambiental CED y GWP, donde la fase de uso es la más incidente, seguida por la fase de materiales y luego, muy poco incidente, la fase de construcción.

Al momento definir los coeficientes de emisiones, para la energía o los materiales de construcción, se encontró muy poca información formal desde los organismos gubernamentales chilenos. Lo mismo ocurrió con las empresas productoras de materiales de construcción en Chile, donde pocas exhibieron los EPD para sus productos construcción. Evidenciando que en materia de inventario de materiales queda mucho por hacer en Chile, donde los vínculos entre el sector público y privado deben estrecharse para estandarizar los procesos pertinentes. Proveer información de inventario ambiental más exacto y preciso para Chile, permitirá realizar ACV que permitan

distinguir con mayor confiabilidad las diferencias ambientales entre proyectos de construcción. (Hoxha, Habert, Lasvaux, Chevalier, & Le Roy, 2017) (Dixit, 2017).

Los resultados de la presente investigación responden solo una fracción menor de las tipologías para viviendas sociales chilenas. Para análisis globales se debieran incorporar nuevas materialidades y nuevas tipologías, tales como, viviendas pareadas y colectivas. Estos últimos tipos de viviendas en Chile presentan menores consumos energéticos en relación a la vivienda aislada (Bustamante et al., 2013), por lo que la incidencia de la fase de uso en las categorías de impacto CED y GWP debiera ser menor en estos casos. Este nuevo aspecto, sumado a la incorporación de aspectos económicos, de consumo de energía para otras necesidades (agua caliente sanitaria, iluminación, etc.) y de energías alternativas, como también, la incorporación de la fase de desuso en los ACV y su respectiva sensibilización de variables, abren nuevas líneas de investigación futuras para los ACV en viviendas sociales chilenas.

El muro de albañilería presenta una carga ambiental importante en contraste a los otros subsistemas de las viviendas modeladas. Además, debido los refuerzos en acero u hormigón armado presentes en la albañilería chilena, los resultados para este tipo de muro se mostraron superiores a los presentes en otras investigaciones que han abordado la albañilería en el mundo. Esto refuerza lo planteado por la bibliografía al establecer que es difícil contrastar resultados entre investigaciones dado el gran número de variables que inciden en los resultados (Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Anand & Amor, 2017)

Finalmente, sustentado en los indicadores obtenidos para TNC, CED y GWP, se concluye que la vivienda social materializada con muros estructurados en madera presentó un mejor desempeño ambiental y confort térmico. Además, destacar que ninguna de las viviendas modeladas, las cuales responden a la normativa vigente en Chile, presentó consumos de energía que respondan a estándares de eficiencia energética.

REFERENCIAS

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Blender, M. (2015). La reglamentación térmica - una mirada a 15 años de vigencia. Retrieved from

- <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-reglamentacion-termica/>
- Borsdorf, A., Hildalgo, R., & Vidal-Koppmann, S. (2016). Social segregation and gated communities in Santiago de Chile and Buenos Aires. A comparison. *Habitat International*, 54, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.033>
- Bovea, M. D., & Powell, J. C. (2016). Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management*, 50, 151–172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.036>
- Brain Valenzuela, I., & Mora, P. (2010). El barrio como motor del valor de la vivienda social en Chile: Evidencia a partir de la Encuesta Panel de Vivienda 2010. *Persona y Sociedad*, 113-145.
- Bunster, V., & Noguchi, M. (2015). Profiling space heating behavior in Chilean social housing: Towards personalization of energy efficiency measures. *Sustainability (Switzerland)*, 7(6), 7973–7996. <https://doi.org/10.3390/su7067973>
- Bustamante, W., Cepeda, R., Martínez, P., & Santa María, H. (2013). Eficiencia Energética en Vivienda Social: Un desafío posible. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*, 33. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Camus, P., Arenas, F., Lagos, M., & Romero, A. (2016). Visión histórica de la respuesta a las amenazas naturales en Chile y oportunidades de gestión del riesgo de desastre. *Revista de Geografía Norte Grande*, 20(64), 9–20. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000200002>
- Cárdenas, J. P., Muñoz, E., Riquelme, C., & Hidalgo, F. (2015). Simplified life cycle assessment applied to structural insulated panels homes Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels). *Revista Ingeniería de Construcción*, 30, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2010.04.005>
- CDT. (2010). Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de la Conservación de la Energía en el Sector Residencial. Santiago.
- CDT. (2015). Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera.
- Chastas, P., Theodosiou, T., Kontoleon, K. J., & Bikas, D. (2018). Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. *Building and Environment*, 130(December 2017), 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>
- Comisión Nacional de Energía. (2018). Factores de Emisión Sistema Eléctrico Chileno. Retrieved from <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(October 2016), 390–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>
- Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>
- Evangelista, P. P. A., Kiperstok, A., Torres, E. A., & Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 169, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>
- Fouquet, M., Levasseur, A., Margni, M., Lebert, A., Lasvaux, S., Souyri, B., ... Woloszyn, M. (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022>
- Gregory, J. (2017). MIT CSHub Webinar: Buildings Life Cycle Assessment. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=5JDcccCxhuE&t=8s>
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>
- Islam, H., Jollands, M., & Setunge, S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>
- Ismaeel, W. S. E. (2018). Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems. *Journal of Cleaner Production*, 182, 783–793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.217>
- Kuittinen, M., & Linkosalmi, L. (2015). Compiling environmental product declarations for wood-based construction products assessment and documentation.
- Lewandowska, A., Noskowiak, A., Pajchrowski, G., & Zarebska, J. (2015). Between full LCA and energy

- certification methodology—a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 9–22. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0805-3>
- Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>
- Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050 - Política-Energética de Chile*. Santiago. Retrieved from http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf
- Ministerio de Energía. (2018). *Factores de emisiones para combustibles utilizados en Chile*. Retrieved from <http://huelladecarbono.minenergia.cl/combustible-chile>
- MINVU. (2014). *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo*, 1434, 151–181.
- MINVU. *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones*, Pub. L. No. D.S.47 (2018). Chile. Retrieved from http://www.minvu.cl/opensite_20061113165715.aspx
- Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción. *Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile*. *Revista de La Construcción*, 11(3), 125–145. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011>
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Muhd, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
- CDT. (2015). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.
- Ondac. (2018). *Manual de costos, materiales y actividades para la construcción*. Santiago.
- Oregi, X., Hernandez, P., & Hernandez, R. (2017). Analysis of life-cycle boundaries for environmental and economic assessment of building energy refurbishment projects. *Energy and Buildings*, 136, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.057>
- Oyarzo, J., & Peuportier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 69(March 2012), 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>
- Reyes, R., Nelson, H., Navarro, F., & Retes, C. (2015). El dilema de la leña, ¿cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción? *Revista Energy for Sustainable Development*, 28, 75–87. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.1.1006.2161>
- Rossi, B., Marique, A. F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- Sousa, J. (2012). Energy simulation software for buildings: Review and comparison. *CEUR Workshop Proceedings*, 923, 57–68.
- Ugarte, J. J., & Acevedo, J. (2016). Taller de investigación y proyecto: *Arquitectura y construcción en madera*.
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, 135, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- Wotherspoon, A. (2018). *Análisis del Ciclo de Vida: midiendo el impacto ambiental de la cuna a la tumba*. Retrieved from <http://www.lignum.cl/reportajes/analisis-del-ciclo-vida-midiendo-impacto-ambiental-la-cuna-la-tumba/>
- Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. *Applied Energy*, 115, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510–2520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.