

## EVALUACIÓN DE LA REPLICABILIDAD Y COMPETITIVIDAD DE UNA VIVIENDA INDUSTRIALIZADA EN MADERA EN CHILE

## EVALUATION OF THE REPLICABILITY AND COMPETITIVENESS OF AN INDUSTRIALIZED WOOD HOUSE IN CHILE

Cid, Allan <sup>(1)</sup> \*; Mazzachiodi, Macarena <sup>(2)</sup>; Victorero, Felipe <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Candidato a Doctor. Université Laval. Québec, Canadá

<sup>(2)</sup> Ing. Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

<sup>(3)</sup> Subdirector de Transferencia. Centro UC de Innovación en Madera, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

\* Contacto: [allan.cid-olivares.1@ulaval.ca](mailto:allan.cid-olivares.1@ulaval.ca)

CÓDIGO: 4620075

### Resumen

Se presenta una evaluación de la replicabilidad de la vivienda industrializada del Barrio Eco-Sustentable Chañaral, proyecto desarrollado como respuesta rápida y efectiva para la reconstrucción de la localidad de Chañaral, ubicada en el norte de Chile. La replicación de este proyecto se evalúa en Antofagasta, Santiago y Concepción, con el fin de determinar y cuantificar los costos y beneficios asociados a la construcción de viviendas industrializadas de madera. Se calculan los costos de construcción, operación y demolición de una vivienda de madera y se comparan con los de una vivienda caso base, que es definida como una vivienda ponderada de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado, según las proporciones de uso de cada material en cada ciudad estudiada. El presente artículo presenta el análisis estratégico del proyecto en el que se calculan los costos por metro cuadrado con el objetivo de extrapolar dichos resultados a proyectos de distintas dimensiones. El análisis de los costos determinó que el factor más importante del proyecto es la inversión inicial (costo de construcción) ya que representa aproximadamente el 90% de los costos totales de los proyectos. En cuanto a los beneficios asociados, el menor gasto en calefacción es el de mayor impacto económico. Otro beneficio asociado que puede ser importante es el menor tiempo de construcción. En una situación de emergencia, por ejemplo, se torna relevante pues las familias afectadas reciben sus viviendas definitivas de forma más rápida.

*Palabras-clave: construcción industrializada en madera, LCCA, competitividad.*

### Abstract

An evaluation of the replicability of the industrialized housing solution used at the Chañaral Eco-Sustainable Neighborhood is presented. This project was developed as a rapid and effective response for the reconstruction of the locality of Chañaral, in northern Chile. The replication of this project is evaluated in Antofagasta, Santiago and Concepción, in order to determine and quantify the costs and benefits associated with the construction of industrialized wood houses. The costs of construction, operation and demolition of a wooden house are calculated and compared with those of a base case house, which is defined as a house made in different proportions in masonry, concrete blocks and reinforced concrete, according to the usage of those materials in each studied city. This article presents the strategic analysis of the project in which the costs per square meter are calculated with the aim of extrapolating these results to projects of different dimensions. The analysis of the costs determined that the most important factor of the project is the initial investment (construction cost) since it represents approximately 90% of the total costs of the projects. In terms of the associated benefits, the lower expenditure on heating has the most economic impact. Other important associated benefit can be the shortest construction time. In an emergency, for example, it becomes relevant because the affected families would receive their definitive homes faster.

*Keywords: timber offsite construction, LCCA, competitiveness.*



## 1. INTRODUCCIÓN

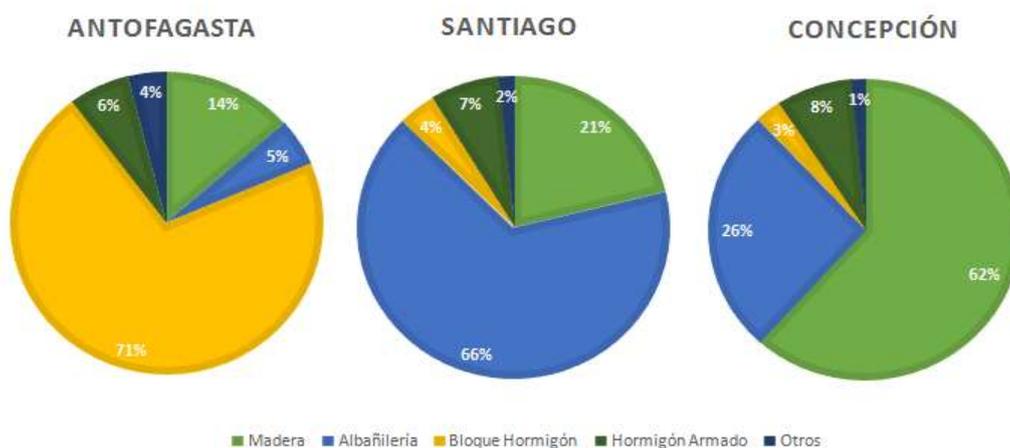
Se evalúa la replicabilidad y competitividad de una vivienda industrializada diseñada por el Centro de Innovación de Madera UC (CIM), las que fueron construida en Chañaral y El Salado entre 2017 y 2018. Para este fin, se realizará una comparación y análisis multivariable de las distintas materialidades utilizadas en la construcción de viviendas sociales en Chile.

Se estudia la replicabilidad en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción. Esta selección fue realizada porque estas ciudades son representativas de las diferentes zonas térmicas y sísmicas del país, además de ser las ciudades con la mayor población de las zonas norte, centro y sur del país (Censo 2002).

*Tabla 1: Porcentaje de la población de las zonas norte, centro y sur del país que habitan en Antofagasta, Concepción y Santiago. Fuente: Censo 2002, CASEN 2013*

Ciudad	Población	% Representatividad	Zona sísmica	Zona térmica
Antofagasta (Norte)	318.779	42%	3	1
Santiago (Centro)	4.668.473	65%	2	3
Concepción (Sur)	912.889	46%	3	4

El caso base corresponde a viviendas sociales que se construirían en lugar del proyecto desarrollado por el CIM. La metodología de la estimación del caso base varía para cada ciudad dependiendo de la distribución de las materialidades y la variación de los costos intrínsecos de construcción para cada materialidad. Para todos los casos se utilizaron datos de costo de viviendas construidas entre 2012 y 2015, considerando la proporción de materiales utilizados para la construcción de viviendas sociales en cada ciudad (Censo 2002 y CASEN 2013), las que se detallan en la Figura 1.



*Figura 1: Porcentajes de viviendas sociales construidos de madera, albañilería de ladrillos, bloques de hormigón, hormigón armado y otros, en Antofagasta, Santiago y Concepción.*

*Fuente: Censo 2002, CASEN 2013*



## 2. METODOLOGÍA

El cálculo de los costos de las viviendas se realiza de acuerdo con su ciclo de vida, considerando las etapas de construcción, operación y demolición. Dentro de cada etapa, se considera tanto el costo de efectuar la construcción, operación y demolición, agregando el costo equivalente de la huella de carbono de cada etapa. A la etapa de construcción se le añade la diferencia de costo por tiempo de construcción (ver Figura 2).

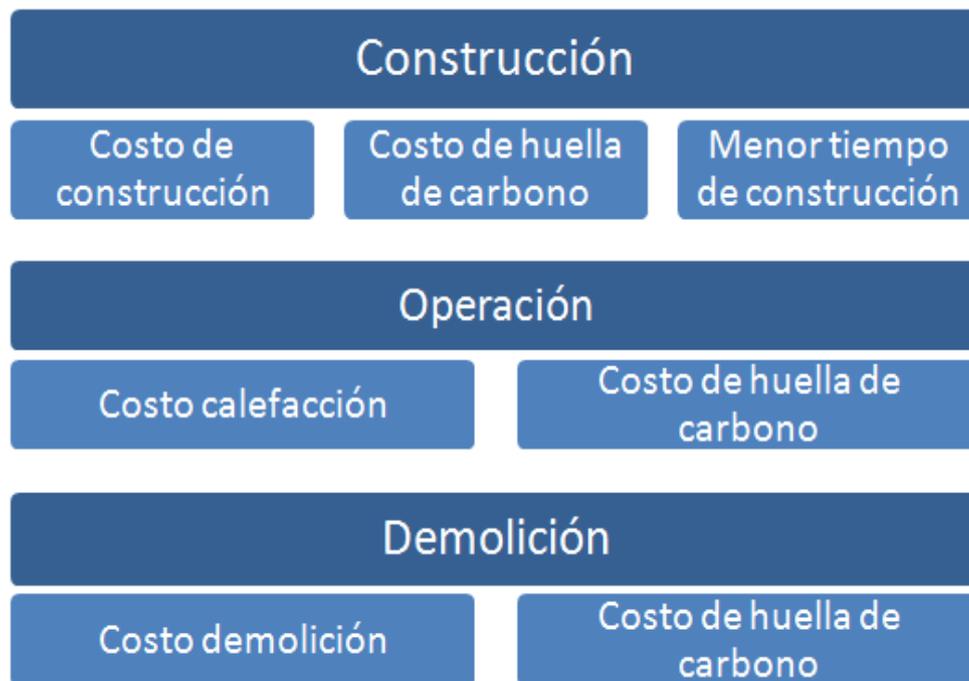


Figura 2: Resumen de las categorías de los costos del proyecto en las distintas etapas.

### 2.1. Costos asociados al proceso de construcción

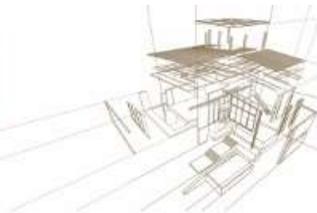
#### 2.1.1. Costo de construcción

La metodología para calcular los costos de construcción del caso base varía en cada zona, la cual se detalla a continuación:

**Antofagasta:** Para el caso base, se utiliza un valor tabla del MINVU (Municipalidad de Antofagasta, 2015). Los costos por vivienda social promedio son de 1.200 UF, con una superficie promedio de 55,9 metros cuadrados. Para los costos del proyecto en madera se usaron los costos del Barrio Eco-Sustentable Chañaral.

**Santiago:** Para calcular los costos de construcción del caso base se utiliza el valor del promedio ponderado de las licitaciones recopiladas. Se opta por esta metodología porque existe evidencia estadística de una relación significativa el costo por metro cuadrado. Para la estimación del costo del proyecto en madera, se obtiene haciendo un paralelo con el valor del percentil en el que se ubica respecto al proyecto en Concepción.

**Concepción:** En este caso, se logra establecer una clara relación entre el costo por metro cuadrado, el costo total del proyecto y la cantidad de viviendas por lote, la cual es estadísticamente válida. Para el cálculo de la alternativa se consideraron los costos de un proyecto hecho en madera asesorado por el CIM en una zona cercana.



### 2.1.2. Huella de carbono de la construcción

El cálculo de la huella de carbono de la construcción considera el peso de los materiales de cada solución constructiva y su respectivo factor de emisión de CO<sub>2</sub>, según la siguiente expresión:

$$kg_{CO_2eq} = FE * m \quad (1)$$

donde:

- $kg_{CO_2eq}$  es la masa de CO<sub>2</sub> equivalente en kilogramos,
- $FE$  es el factor de emisión,
- $m$  es la masa del material, en kilogramos.

La cantidad de material para cada vivienda se obtiene a partir del programa *Design Builder*. Los factores de emisión se obtienen de las empresas chilenas productoras y los valores publicados en Inventory of Carbon & Energy V1.6a (Hammond, 2008).

El cálculo del costo de la huella de carbono se realiza a través de los costos sociales asociados a las emisiones de CO<sub>2</sub>, que se calculan con el impuesto de US\$ 5 por tonelada emitida de CO<sub>2</sub>, valor vigente en Chile a partir del año 2017.

### 2.1.3. Beneficio social asociado a un menor tiempo de construcción

Construir un proyecto en madera requiere menos de la mitad del tiempo que los materiales tradicionales (Lehmann, 2013), lo que implica que los beneficiarios se encuentran un menor tiempo en condiciones habitacionales insuficientes. Esto significa un beneficio social que se cuantifica a través del subsidio arriendo que otorga el Estado de Chile (MINVU, 2015), el cual consiste en un subsidio de 3 UF mensuales por familia. Dicho subsidio será descontado a una tasa mensual de 0,49%.

Para efectos de comparación se considera un período de construcción de 8 meses para el proyecto de madera y de 16 meses para el caso base.

## 2.2. Operación

### 2.2.1. Costos de calefacción

Los costos de calefacción se calculan considerando la demanda anual por calefacción para cada tipo de vivienda y ciudad. Luego, se calcula el precio de la energía por kWh para obtener el monto anual gastado en calefacción.

Se realizó una simulación utilizando un modelo de la vivienda desarrollada por CIM en el software *Design Builder* (Figura 3). Se modifica la materialidad de cada elemento para realizar una comparación entre materialidades.

El software calcula la energía necesaria para alcanzar la temperatura interior de confort, utilizando para esto las variables climáticas de la ciudad y la estructura de la vivienda. Se utiliza el diseño de las viviendas del Barrio Eco-Sustentable Chañaral y se modela el desempeño energético de una vivienda construida en madera, albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado.

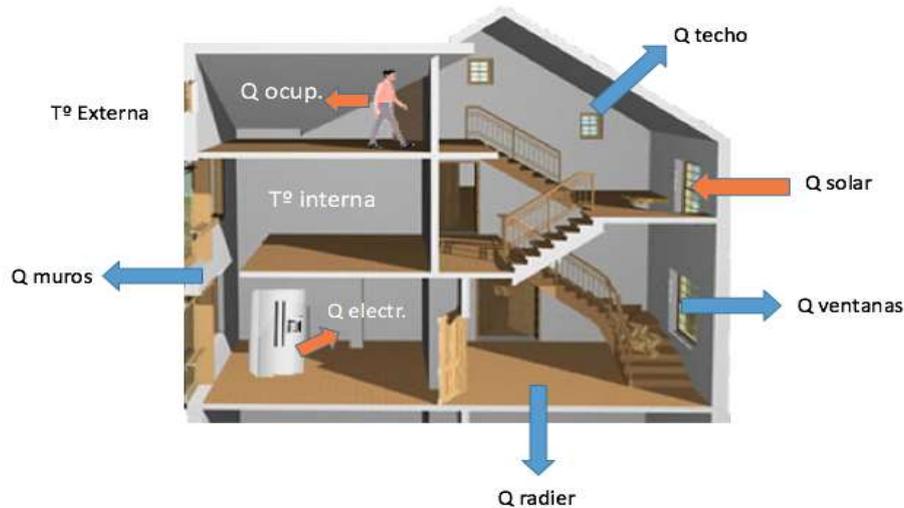
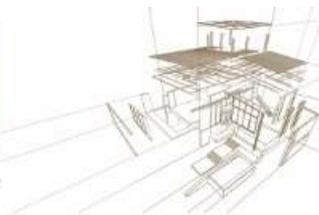
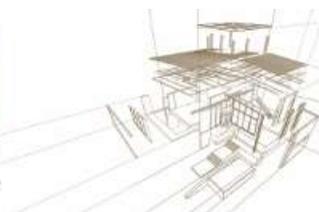


Figura 3: Modelo de flujos de calor (ganancias y pérdidas).

Las características de estas viviendas, i.e. los factores de pérdidas (Tabla 2) y de ganancias (Tabla 3) se establecen a partir de las soluciones constructivas del MINVU definidas para cada zona térmica.

Tabla 2: Factores de pérdida utilizados en la simulación: factores de transmitancia (factores  $U$ ) para los muros, techos y fundación de las viviendas de cada material y factores de ganancia por ocupación y electrodomésticos para las cuatro ciudades, según zona térmica. Valores en  $W/m^2K$ .

			Antofagasta	Santiago	Concepción
			2,00	3,00	4,00
Pérdida de calor	Muros	Madera	0,37	0,37	0,37
		Albañilería	1,30	1,30	1,30
		Bloques de hormigón	1,60	1,30	1,30
		Hormigón armado	1,80	1,80	1,50
	Techo de madera con poliestireno		0,29		
	Ventanas (vidrio de 3mm de espesor)		5,90		
	Piso de hormigón armado		1,50		



*Tabla 3: Factores de ganancia utilizados en la simulación: factores de transmitancia (factores U) para los muros, techos y fundación de las viviendas de cada material y factores de ganancia por ocupación y electrodomésticos para las cuatro ciudades, según zona térmica.*

Ganancia de calor	Ganancias por electrodomésticos	6,400 W/m <sup>2</sup>
	Ganancias por ocupación	0,023 W/persona

Se define la temperatura de confort para todas las viviendas en 20 °C (CIBSE) y se considera el uso de la calefacción solamente entre las 06:00 y 22:00 horas.

### 2.2.2. Cálculo de costo anual de calefacción

Se considera la calefacción de una estufa a parafina y a leña dado que son los combustibles de menor costo por kWh y los métodos de calefacción más utilizados (CADEM,2014). Los tipos de combustible y sus respectivos precios por kWh en Antofagasta, Santiago y Concepción se encuentran a continuación en la Tabla 4.

*Tabla 4. Tipo de combustibles considerado y los precios por kWh de los combustibles para Antofagasta, Santiago y Concepción.*

	Tipo de combustible	Precio
Antofagasta	Parafina	57,1 CLP/kWh
Santiago	Parafina	57,0 CLP/kWh
Concepción	Parafina	58,0 CLP/kWh
	Leña	23,6 CLP/kWh

El consumo anual de energía por vivienda (en kWh) se multiplica por los precios por kWh de la parafina y leña para las distintas ciudades y se obtienen los precios anuales de la calefacción por vivienda.

Los costos de calefacción del caso base se obtienen a partir de la ponderación según el material de construcción utilizado para cada región.

### 2.3. Huella de carbono de la operación

La emisión de CO<sub>2</sub> de la operación es generada por las estufas de leña y parafina. El cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se realiza a través de un factor de emisión (kgCO<sub>2</sub>/kWh) para ambos combustibles que se multiplica por la cantidad de kWh generadas por las estufas.

Como se mencionó anteriormente se considera el uso de una estufa de parafina en Antofagasta y Santiago, mientras que en Concepción se considera el uso ponderado de ambas estufas (parafina y leña, Tabla 5).

*Tabla 5. Factores de emisión de CO<sub>2</sub> para la combustión de parafina y de leña.*

	Parafina	Leña
Factor de emisión (kgCO <sub>2</sub> /kWh)	0,26	0,4



## 2.4. Demolición

### 2.4.1. Costo de demolición

El costo de demolición se calcula con los valores de la demolición de suelos por m<sup>2</sup> y demolición de muros por m<sup>3</sup> para los cuatro materiales de construcción (ver Tabla 6).

*Tabla 6. Costos unitarios de demolición por m<sup>2</sup> de superficie y m<sup>3</sup> de muros de una vivienda de madera, albañilería de ladrillos, bloques de hormigón y hormigón armado (CYPE, Ingenieros).*

Costos unitarios	Madera	Albañilería de ladrillos	Bloques de hormigón	Hormigón armado
Costo de demolición de suelos (UF/ m <sup>2</sup> )	0,18	0,50	0,50	0,50
Costo de demolición de muros (UF/m <sup>3</sup> )	0,21	0,46	0,97	1,75

Para obtener el costo de demolición por vivienda se multiplican los costos unitarios por la superficie y la cantidad de m<sup>3</sup> de muro de las viviendas, y se obtienen los costos de la demolición para cada una de las viviendas en las distintas ciudades.

Finalmente, se ponderan los costos de la demolición de la vivienda de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado para obtener el costo de demolición del caso base. Los valores se dividen por la superficie de la vivienda (55,9 m<sup>2</sup>) y se obtienen los costos por m<sup>2</sup> de la vivienda de madera y del caso base.

### 2.4.2. Huella de carbono de la demolición

La huella de carbono de la demolición para el proyecto de madera y las alternativas de albañilería, bloques de hormigón y hormigón armado se calculan usando la misma metodología que en el cálculo de la huella de carbono de la construcción. Se obtuvo que el factor de emisiones por kilogramo de demolición varía entre 0,004 y 0,01 kg CO<sub>2</sub>/kg material (Nielsen, 2008). Para hacer una aproximación conservadora se utiliza el valor de 0,01 kilogramos de CO<sub>2</sub> por kilogramos de demolición. El peso del edificio a ser demolido se obtiene de los cálculos del software *Design Builder* (Tabla 7).

*Tabla 7. Peso de material de una vivienda de madera y caso base, y la emisión de CO<sub>2</sub> de la demolición de una vivienda.*

	Antofagasta		Santiago		Concepción	
	Madera	Caso Base	Madera	Caso Base	Madera	Caso Base
Peso total (kg)	21.934	28.006,6	21.934	26.507,6	21.934	26.447,8
Emisión de CO <sub>2</sub> (kg)	219,3	280,1	219,3	265,1	219,31	264,5



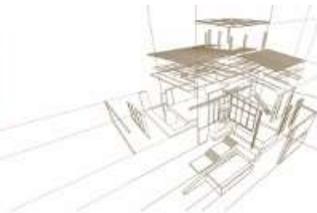
### 3. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos (ver Tabla 8), se puede observar que el mayor impacto en los costos totales se debe a la construcción de los proyectos, ya que constituyen aproximadamente el 90% de estos. Por esta razón es que los beneficios sociales asociados a la construcción en madera sólo se tornan importantes económicamente cuando los costos de construcción de los proyectos son similares.

Las ventajas sociales del proyecto madera son mayores a las del caso base, ya que se tiene un menor consumo de calefacción, una menor huella de carbono y un menor tiempo de construcción en todas las ciudades en donde se realizó el análisis de replicabilidad.

Tabla 8: Flujos de costos descontados (UF/m<sup>2</sup>).

Resumen costos en UF/m <sup>2</sup>							
Etapas		Antofagasta		Santiago		Concepción	
		Proyecto madera	Caso base	Proyecto madera	Caso base	Proyecto madera	Caso base
Construcción	Costo de construcción (UF/m <sup>2</sup> )	19,51	21,82	18,8	16,48	16,42	15,7
	Huella carbono construcción (UF/m <sup>2</sup> )	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
	Tiempo de construcción (UF/m <sup>2</sup> )	0,42	0,78	0,42	0,78	0,42	0,78
Operación	Calefacción (UF/m <sup>2</sup> )	0,34	0,61	2,73	3,46	0,64	0,88
	Huella carbono operación (UF/m <sup>2</sup> )	0,00	0,01	0,04	0,04	0,05	0,07
Demolición	Demolición (UF/m <sup>2</sup> )	0,03	0,09	0,03	0,07	0,03	0,08
	Huella carbono demolición (UF/m <sup>2</sup> )	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
TOTAL (UF/m <sup>2</sup> )		20,33	23,33	22,03	20,86	18,20	18,42



#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que es rentable replicar el proyecto en madera en las ciudades de Antofagasta y Concepción, ya que los costos totales son menores a los del caso base. En Antofagasta, el costo de las viviendas sociales promedio es elevado por lo que el proyecto en madera es competitivo en dicha ciudad. En el caso de Concepción, los costos de construcción son mayores en el proyecto en madera, sin embargo, el gasto en calefacción es menor y vuelve competitivo al proyecto de madera.

En Santiago los costos del proyecto en madera son mayores a los costos de las viviendas sociales promedio construidas en la ciudad, razón por la cual no se recomienda replicar el proyecto en Santiago.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2015). Anuncian construcción de 6.230 viviendas en la región de Antofagasta. Recuperado el 01 de Junio 2016, desde [http://www.minvu.cl/opensite\\_det\\_20150312154726.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_det_20150312154726.aspx)

El Mercurio. (2015). Chile necesita reparar o ampliar 1,2 millones de casas y construir otras 459 mil. Recuperado el 01 de junio 2016 desde <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2015/07/29/chile-necesita-reparar-o-ampliar-12-millones-de-casas-y-construir-otras-459-mil/>

Steffen Lehmann, Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions, Sustainable Cities and Society, Volume 6, February 2013, Pages 57-67, ISSN 2210-6707.

Comisión Nacional de Energía (2016). Precio parafina. Recuperado el 18 de mayo desde: <http://parafinaenlinea.cl/buscador?region=4>

CYPE Ingenieros S.A. (2016). Precios demolición de un muro de albañilería. (2013, Septiembre). Recuperado Abril 27, 2015, de

[http://www.chile.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Demoliciones/Estructuras/Albanileria/Demolicion\\_de\\_muro\\_de\\_albanileria.html](http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Demoliciones/Estructuras/Albanileria/Demolicion_de_muro_de_albanileria.html)

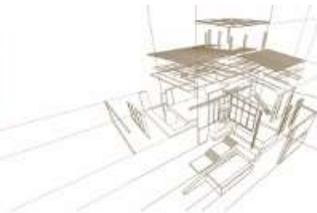
CADEM (2014). Informe Final: Primera Encuesta Nacional de Medio Ambiente: Opiniones, Comportamientos y Preocupaciones. Recuperado desde: [http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/05/Informe-Final-Primera-Encuesta-Nacional-de-Medio-Ambiente\\_Final.pdf](http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/05/Informe-Final-Primera-Encuesta-Nacional-de-Medio-Ambiente_Final.pdf)

Ilabaca et al. (1999). Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and other Respiratory Illnesses among Children in Santiago, Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(9), 154-163. doi:10.1080/10473289.1999.10463879

Clínica Alemana (2011). Contaminación intradomiciliaria: Un enemigo silencioso que debemos conocer. Recuperado el 13 de junio desde:

<https://portal.alemana.cl/wps/wcm/connect/Internet/Home/blog-de-noticias/Ano+2011/07/Contaminacion+intradomiciliaria>

Pino et al. (2016). Contaminación intradomiciliaria por material particulado fino (MP2,5) en hogares de recién nacidos. *Revista Chilena De Pediatría*. doi:10.1016/j.rchipe.2016.04.007



Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41(7), 940-951.  
doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.008

Gobierno de Chile (1996). Diseño sísmico de edificios. Recuperado el 20 de mayo desde:  
[http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/sismos/normaChilena\\_NCh433-1996.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/sismos/normaChilena_NCh433-1996.pdf)

Chile, Gobierno Regional, Municipalidad de Antofagasta. (2015, Diciembre 17). Plan Creó Antofagasta. Recuperado Junio 12, 2016, de <http://creoantofagasta.cl/documentos-descarga/Ciudad-Sustentable.pdf>

Hammond, G. (2008). Inventory of Carbon and Energy Version 1.6a. Sustainable Energy Research Team University of Bath. Recuperado Junio 10, 2016, de  
[http://www.ecocem.ie/downloads/Inventory\\_of\\_Carbon\\_and\\_Energy.pdf](http://www.ecocem.ie/downloads/Inventory_of_Carbon_and_Energy.pdf)

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M., 2005, The ecoinvent database, *International Journal of Life Cycle Assessment* 10, 3–9.

Arauco. "Arauco Efectuó la Medición de su Huella de Carbono." *Issues & Answers* (2009). Recuperado Mayo 27, 2016, de [http://www.arauco.cl/\\_file/file\\_264\\_04.pdf](http://www.arauco.cl/_file/file_264_04.pdf)

Melon. "Melon y su Huella de Carbono." *Issues & Answers* (2009). Recuperado Mayo 27, 2016, de <http://www.melon.cl/sustentabilidad/huella-co2>

Chile. MINVU. Ministerio De Vivienda Y Urbanismo. (2016). Plan FONDO SOLIDARIO DE ELECCION DE VIVIENDA D.S.49. Web. Recuperado Junio 12, 2016, de  
[http://www.minvu.cl/opensite\\_20150713124520.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_20150713124520.aspx)

COCHILCO, 2012. Actualización de Información sobre las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas a la Minería del Cobre al año 2012. Recuperado Junio 10, 2016, de  
[http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Actualizacion-info-emisiones-gases-invernadero\\_2012.pdf](http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Actualizacion-info-emisiones-gases-invernadero_2012.pdf)

Suecia, Gobierno de Suecia, Ministerio de medioambiente. (2011). 20 years of carbon pricing in Sweden 1991 – 2011 History, current policy and the future. Extraído de:  
<https://www.ceps.eu/sites/default/files/MinistrySweden.pdf>