



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN



MÁSTER OFICIAL
UNIVERSITARIO
EDIFICACIÓN

USO DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN CHILE

Trabajo Fin de Máster
2021

Alumno:

Felipe R. Monsalve Montoya

Tutor:

Dr. David Soler Fernández

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, mis padres, mi hermana y en especial a mi pareja, juntos nos aventuramos a empezar una nueva etapa al otro lado del charco.

Gracias también a mis amigos, tanto a aquellos de toda la vida como las nuevas amistades del máster, con quienes nos quedamos tantas noches trabajando juntos, y siempre pasándolo en grande.

Especialmente, quiero darle las gracias a mi tutor, David Soler, por todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo, sin el cual éste no habría sido posible.

Y, agradecer a todos los profesores del máster quiénes han compartido su conocimiento y experiencias con pasión.

RESUMEN

Chile actualmente cuenta con alto déficit de edificación habitacional, especialmente en sectores socio económicos vulnerables de la sociedad. Ante esta situación el estado ha aplicado una política subsidiaria que permita a las personas acceder a una vivienda en propiedad. Paralelamente a esta situación, el país ha ido adquiriendo compromisos cuyo objetivo es la reducción del impacto ambiental de las actividades económicas desarrolladas en el país.

Los esfuerzos en la reducción del impacto ambiental se han centrado en disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual puede implicar transformaciones en los procesos productivos de los países asociados a nuevas inversiones. Esto puede originar una pérdida de competitividad en las economías emergentes en caso de no verse capaces de adaptar su matriz productiva.

Una forma de reducir el impacto ambiental de los productos es la reducción de su huella energética, a través de una selección adecuada de materiales que lleven un menor impacto ambiental incorporado.

El objetivo de este TFM es buscar una combinación óptima de materiales que permita reducir la huella energética de las viviendas objeto de la política subsidiaria del país y que, a la vez, permita mejorar las condiciones de confort térmico que estas entregan, centrándose en la parte opaca de la envolvente de la vivienda estudiada.

La solución propuesta se determinará mediante el empleo de técnicas de optimización matemática que busquen la mejor combinación entre los materiales disponibles en el mercado chileno.

PALABRAS CLAVE

- i. Aislación
- ii. Chile
- iii. Construcción
- iv. Cubierta
- v. Eficiencia energética
- vi. Energía incorporada
- vii. Envolvente
- viii. Fachada
- ix. Huella energética
- x. Optimización
- xi. Programación lineal entera
- xii. Resistencia térmica
- xiii. Subsidio habitacional
- xiv. Transmitancia térmica
- xv. Vivienda

ABSTRACT

Currently in Chile there is a high lack of residential buildings, especially on society's vulnerable socioeconomic people. To deal with this problem, the estate of Chile has applied a subsidiary policy which has made possible getting a home. Concurrently to this situation, Chile has been getting commitments whose purpose is to minimize the environmental impact of economic activities of the country.

The efforts of reducing environmental impact have been focused on reducing greenhouse gases emissions. This may need transformations on countries' productive process which may imply investments. This could cause a lack of competitiveness on emerging economies who could not be able of adapting its productive matrix.

Reducing energy footprint of products is a way of minimizing its environmental impact, through a better selection of their materials which imply a lower environmental impact associated.

The aim of this work is finding an optimal combination of materials that allows a reduction of social interest homes' energy footprint and permits to improve the thermal comfort that they give. This study will be focused on the opaque part of the building's envelope.

The proposal will be determined by using mathematical optimization techniques which look for the best combination among materials available on Chilean market.

KEY WORDS

- i. Chile
- ii. Construction
- iii. Energy efficiency
- iv. Energy footprint
- v. Envelope
- vi. Façade
- vii. Home
- viii. House
- ix. Housing subsidy
- x. Incorporated energy
- xi. Integer linear programming
- xii. Isolating
- xiii. Optimization
- xiv. Roofing
- xv. Thermal resistance
- xvi. Thermal transmittance

RESUM

Xile actualment compta amb un alt dèficit d'edificació residencial, especialment en sectors socioeconòmics vulnerables de la societat. Davant d'aquesta situació l'estat ha aplicat una política subsidiària que permeta a les persones accedir a un habitatge en propietat. Paral·lelament a aquesta situació, el país ha anat adquirint compromisos amb l'objectiu de reduir l'impacte ambiental de les activitats econòmiques desenvolupades al país.

Els esforços en la reducció de l'impacte ambiental s'han centrat a en disminuir les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle, la qual cosa pot implicar transformacions en els processos productius dels països associats a noves inversions. Això pot originar una pèrdua de competitivitat en les economies emergents en cas de no veure's capaces d'adaptar la seua matriu productiva.

Una manera de reduir l'impacte ambiental dels productes és la reducció de la seua petjada energètica, a través d'una selecció adequada de materials que comporten un menor impacte ambiental incorporat.

L'objectiu d'aquest TFM és buscar una combinació òptima de materials que permeta reduir la petjada energètica dels habitatges objecte de la política subsidiària del país i que, alhora, permeta millorar les condicions de confort tèrmic que aquests oferixen, centrant-se en la part opaca de l'envolupant de l'habitatge estudiat.

La solució proposada es determinarà mitjançant l'ús de tècniques d'optimització matemàtica que busquen la millor combinació entre els materials disponibles en el mercat xilè.

PARAULES CLAU

- i. Aïllant
- ii. Coberta
- iii. Construcció
- iv. Eficiència energètica
- v. Energia incorporada
- vi. Envolupant
- vii. Façana
- viii. Habitatge
- ix. Optimització
- x. Petjada energètica
- xi. Programació lineal entera
- xii. Resistència tèrmica
- xiii. Subsidi residencial
- xiv. Transmissió tèrmica
- xv. Xile

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- i. **CChC:** Cámara Chilena de la Construcción.
- ii. **COP21:** vigésima primera Conferencia de las Partes.
- iii. **CNE:** Comisión Nacional de Energía, Chile.
- iv. **CTE:** Código Técnico de la Edificación.
- v. **DS:** Decreto Supremo.
- vi. **FO:** función objetivo.
- vii. **GEI:** gases de efecto invernadero.
- viii. **IEA:** International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía).
- ix. **INE:** Instituto Nacional de Estadística, Chile.
- x. **IVA:** impuesto al valor añadido.
- xi. **KTOE:** kilo toneladas equivalentes en combustible.
- xii. **MINVU:** Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.
- xiii. **NCh:** norma chilena oficial.
- xiv. **PL:** programación lineal.
- xv. **PLE:** programación lineal entera.
- xvi. **PUC:** Pontificia Universidad Católica de Chile.
- xvii. **SERVIU:** Servicio de Vivienda y Urbanismo, MINVU, Chile.
- xviii. **SII:** Servicio de Impuestos Internos, Chile.
- xix. **TFM:** trabajo fin de máster.
- xx. **UF:** unidad de fomento.
- xxi. **ZT:** zona térmica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	1
Resumen.....	2
Palabras clave	2
Abstract.....	3
Key words.....	3
Resum	4
Paraules claus.....	4
Siglas y acrónimos.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Introducción	10
1.2 El sector residencial en Chile	14
1.3 Justificación	17
1.3.1 Planteamiento del problema	17
1.3.2 Metodología: Programación Lineal Entera	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 Alcance.....	18
1.6 Programación lineal entera.....	18
1.6.1 Softwares de programación lineal	20
2. CHILE: GEOGRAFÍA, LEGISLACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	21
2.1 Geografía.....	22
2.1.1 Organización territorial.....	22
2.2 Clima	23
2.3 Normativa térmica.....	23
2.4 Análisis de los sistemas constructivos.....	24
2.4.1 Construcción en albañilería	25
2.4.2 Construcción en tabiquería.....	27
2.4.2.1 Tabiquería de madera	27
2.4.2.2 Tabiquería de acero galvanizado	28
2.5 Subsidios	28
2.6 Conclusiones	29
3. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN.....	30
3.1 Planteamiento y modelización	31
3.2 Caso de estudio	33
3.2.1 Vivienda tipo	33
3.3 Materiales.....	36

3.4	Formulación del problema	38
3.5	Restricciones	41
3.5.1	Composición de las capas	41
3.5.2	Presupuesto disponible.....	41
3.5.3	Espesores permitidos.....	42
3.5.4	Límites de transmitancia	43
3.5.5	Incompatibilidades	43
3.6	Redacción del modelo	43
3.6.1	Redacción en Wolfram Mathematica.....	43
3.6.2	Redacción en Solver	48
3.7	Equipo empleado	52
4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	53
4.1	Análisis de los resultados	54
4.1.1	Solución óptima teórica.....	56
4.2	Consideraciones y escenarios.....	57
4.2.1	Análisis de los resultados	58
5.	CONCLUSIONES.....	64
5.1	Conclusiones	65
5.2	Futuras investigaciones	66
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
6.1	Bibliografía	68
7.	ANEXOS	71
	Anexo 1: zonas térmicas	72
	Anexo 2: tabla de materiales.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Grados día anuales por zona térmica [2]	24
Tabla 2	Exigencias normativa térmica chilena (MINVU) [33]	24
Tabla 3	Montos de subsidios para construcción en sitio propio según DS N°1 [40]	29
Tabla 4	Materiales propuestos (propia)	39
Tabla 5	Comparativa resultados modelo general (propia)	54
Tabla 6	Diferencias entre soluciones (propia)	56
Tabla 7	Comparación entre vivienda tipo solución propuesta (propia)	56
Tabla 8	Comparación entre los distintos escenarios (propia).....	58
Tabla 9	Comparación entre vivienda tipo, escenario general y escenario con presupuesto limitado (propia).....	62
Tabla 10	Tabla de materiales (propia)	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Consumo energético en edificación residencial, 2017 (IEA, 2019)	11
Figura 2	Consumo energético por sectores en Chile (CNE).	13
Figura 3	Consumo energético por Regiones, Chile (CNE).	13

Figura 4 Total de energía final consumida en Chile (IEA) [16].	14
Figura 5 Distribución de las tipologías de vivienda en Chile (Censo 2017, INE) [18]	14
Figura 6 Tipo de construcción en las casas (PUC) [22].	15
Figura 7 Tipología de viviendas objeto (Celis et al.) [2]	16
Figura 8 Diagrama de flujo del algoritmo SIMPLEX (propia)	20
Figura 9 Chile (Wikipedia)	22
Figura 10 Ladrillo macizo [36]	25
Figura 11 Ladrillo hueco [36]	25
Figura 12 Ladrillo perforado [36]	25
Figura 13 Construcción en albañilería armada (propia)	26
Figura 14 Albañilería confinada [36]	26
Figura 15 Tabiquería de madera (habitissimo.cl)	28
Figura 16 Tabiquería de perfiles de acero galvanizado (cintac.cl)	28
Figura 17 Detalle constructivo del caso de estudio (propia)	33
Figura 18 Planta de arquitectura (Quinta Servicios Ltda.)	34
Figura 19 Planta de cubierta (Quinta Servicios Ltda.)	35
Figura 20 Elevaciones (Quinta Servicios Ltda.)	36
Figura 21 Redacción del vector con los términos que multiplican a la FO en Mathematica (propia)	44
Figura 22 Redacción de la matriz que contiene las restricciones (propia)	45
Figura 23 Límites de las restricciones (propia)	46
Figura 24 Redacción del vector "lu" (propia)	47
Figura 25 Resolución mediante LinearProgramming (propia)	48
Figura 26 Cálculo del peso de la función objetivo (propia)	48
Figura 27 Cronómetro del tiempo de ejecución (propia)	48
Figura 28 Estructura de la información en Excel (propia)	49
Figura 29 Captura de pantalla de Solver (propia)	49
Figura 30 Captura de pantalla de la ventana opciones de Solver (propia)	50
Figura 31 Informe de resultados generado en Solver (propia)	51
Figura 32 Mapa de zonas térmicas de la VI Región [33]	58
Figura 33 Variación de la huella energética en función del presupuesto (propia)	59
Figura 34 Comparativa gráfica entre las soluciones (propia)	60
Figura 35 Comparativa gráfica entre las soluciones, sin vivienda tipo (propia)	61
Figura 36 Zonas térmicas Región de Tarapacá (MINVU)	72
Figura 37 Zonas térmicas Región de Antofagasta (MINVU)	72
Figura 38 Zonas térmicas Región de Atacama (MINVU)	73
Figura 39 Zonas térmicas Región de Coquimbo (MINVU)	73
Figura 40 Zonas térmicas Región de Valparaíso (MINVU)	74
Figura 41 Zonas térmicas Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins (MINVU)	74
Figura 42 Zonas térmicas Región del Maule (MINVU)	75
Figura 43 Zonas térmicas Región del Bío Bío (MINVU)	75
Figura 44 Zonas térmicas Región de La Araucanía (MINVU)	76
Figura 45 Zonas térmicas Región de Los Lagos (MINVU)	76
Figura 46 Zonas térmicas Región de Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo (MINVU)	77
Figura 47 Zonas térmicas Región de Magallanes y Antártica chilena (MINVU)	77
Figura 48 Zonas térmicas Región de Metropolitana de Santiago (a) (MINVU)	78
Figura 49 Zonas térmicas Región de Metropolitana de Santiago (b) (MINVU)	78
Figura 50 Zonas térmicas Región de Los Ríos (MINVU)	79
Figura 51 Zonas térmicas Región de Arica y Parinacota (MINVU)	79

1. *INTRODUCCIÓN*

1.1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la eficiencia energética ha cobrado relevancia, tanto a niveles de producción como en la opinión pública, produciéndose en el año 2018 un punto de inflexión y verdadera toma de relevancia a nivel internacional de los movimientos ecologistas en los diferentes países [1].

Si bien la mayor parte de la presión sobre la reducción de las emisiones de CO₂ se ha hecho en las economías desarrolladas, al elevarse los costes de producción de energía hace que sea imprescindible reevaluar los sistemas productivos en los países en desarrollo, cuyos sectores productivos pueden verse perjudicados en el caso de no corregir y mejorar la eficiencia energética de sus procesos [2].

El sector de la construcción no se ha quedado fuera de esta tendencia, pues a lo largo de los años se han aprobado medidas más restrictivas para contener el impacto que el ejercicio de su actividad produce en el entorno que le rodea.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA), se entiende por **eficiencia energética** la gestión y restricción del aumento en el consumo de energía. Un edificio es más eficiente cuando entrega más servicios por la misma cantidad de energía, o los mismos servicios consumiendo menos energía [3, 4].

Por otra parte, se define la **energía incorporada** o **huella energética** como la cantidad de energía gastada en todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción o producción de su materia prima, hasta su posterior deshecho o reciclaje [5].

La industria de la construcción consume grandes cantidades de materiales y energía en el ejercicio de su actividad. En los últimos años, el consumo operacional y las emisiones de efecto invernadero han tendido claramente a la baja, no obstante, se estima que para el año 2050 se hayan consumido el 75% de los recursos disponibles en los países desarrollados [5].

Estos estudios muestran que, si bien se han conseguido progresos en la reducción del impacto de la construcción en su entorno, éstos aún no son suficientes para lograr construcciones eficientes.

En Europa, el sector de la construcción es el responsable del 40%, aproximadamente, del total de la energía consumida, y del 45% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera [6]. Los efectos de este sector pueden en ocasiones descuidarse ya que sus efectos son indirectos. Estos efectos colaterales han de ser considerados en el diseño de los edificios del futuro [5].

En el caso de los edificios, la eficiencia energética está fuertemente ligada a su envolvente, que es el elemento encargado de separar el espacio físico exterior e interior del edificio, jugando un papel crucial en el control de la transmisión de la energía térmica y evitando el ruido excesivo del exterior dentro de los recintos [7].

La capacidad que tiene la envolvente de aislar térmicamente al edificio del entorno se mide a través de la transmitancia térmica. McMullan define **transmitancia térmica (U)** ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) de una pared formada por n capas con la siguiente ecuación [8]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (1)$$

Donde:

- i. λ_i : conductividad térmica de la capa i ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).
- ii. e_i : grosor de la capa i (m).
- iii. $1/h_{int}$: resistencia térmica superficial interior ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).
- iv. $1/h_{ext}$: resistencia térmica superficial exterior ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

Durante el año 2019, de acuerdo con el informe “Energy efficiency indicators” de la IEA, en el sector residencial, la calefacción de los recintos significó la mitad del consumo energético de las viviendas. Los mayores consumos se concentraron en los países europeos, y los menores en países de Asia y Oceanía [9].

En los distintos países que forman parte de la IEA se han producido mejoras en el consumo de energía para la calefacción de recintos. Esto se debe principalmente a la mejora en el aislamiento de los edificios, renovación de construcciones antiguas y mejoras en los equipos [9]. La IEA informa que la distribución de la energía consumida se ha desagregado como se muestra en la Figura 1:

Consumo energético en edificación residencial, 2017 (IEA)

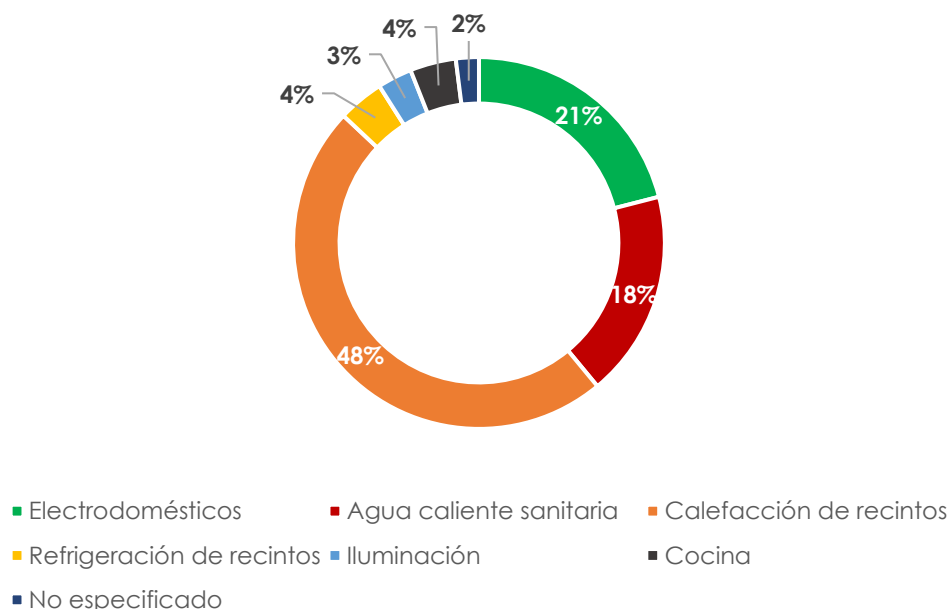


Figura 1 Consumo energético en edificación residencial, 2017 (IEA, 2019)

Al contrastar la información de las distintas investigaciones resulta evidente que la calefacción de las viviendas es el principal destino del consumo de energía de las viviendas, siendo el principal componente de la huella energética del edificio durante su etapa de explotación.

Crawford y Treloar determinaron que, en su investigación sobre los edificios construidos en Australia, la energía incorporada en las construcciones es de 20 a 50 veces superior a la energía de operación de éstos [10].

En los edificios actuales la energía operacional ronda los 187,2 MJ/m²/año, mientras que la energía incorporada se sitúa en 2.372 MJ/m², es decir, sólo la energía incorporada en los edificios representa aproximadamente el 25,3% de la energía operacional necesaria para los primeros 50 años de vida útil del edificio [5].

En el año 2007, la Unión Europea asumió tres objetivos fundamentales para 2020 en relación con la lucha contra el cambio climático y consumo de energía [11]:

- i. Reducción de un 20% en las emisiones de gases efecto invernadero, respecto a niveles de 1990.
- ii. 20% de la energía procedente de fuentes renovables.
- iii. Mejora de un 20% en la eficiencia energética.

Por su parte, Chile, en el año 2015, durante la COP21 adquiere el compromiso de reducir en al menos un 30% sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 [12, 13].

Además, Chile cuenta con el “Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022”, presentado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile [14]. En este documento se establecen las líneas de acción que seguirá el país para la lucha contra el cambio climático. El plan se enfoca en los siguientes objetivos:

- i. **Objetivo adaptación:** fortalecer la capacidad del país para adaptarse a los efectos del cambio climático, minimizando los efectos negativos y aprovechando todas las oportunidades que éste entregue.
- ii. **Objetivo mitigación:** crear las condiciones que permitan implementar, cumplir y llevar el seguimiento de los compromisos adoptados por Chile en la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI).
- iii. **Objetivo de medios de implementación:** desarrollar las condiciones que permitan implementar las acciones de mitigación y adaptación, a nivel nacional y subnacional, en el ámbito institucional, legal y técnico.
- iv. **Objetivo de gestión del cambio climático a nivel regional y comunal:** desarrollar las bases institucionales, operativas y capacidades necesarias para la gestión, incorporando a todos los actores sociales.

Los objetivos se traducen en ejes de acción mediante los cuales se llevará a cabo el plan:

- i. Adaptación.
- ii. Mitigación.
- iii. Medios de implementación.
- iv. Gestión del cambio climático a nivel regional y comunal.

De acuerdo con el Anuario estadístico de energía, de la Comisión Nacional de Energía, en Chile el sector residencial representa el 22% del consumo de energético del país, siendo el tercer sector en volumen de consumo (ver Figura 2). Por otro lado, en la zona

central del país, en la Región de Valparaíso y Región Metropolitana se concentra el 37% del consumo nacional de energía [15] (ver Figura 3).

Consumo energético por sectores en Chile

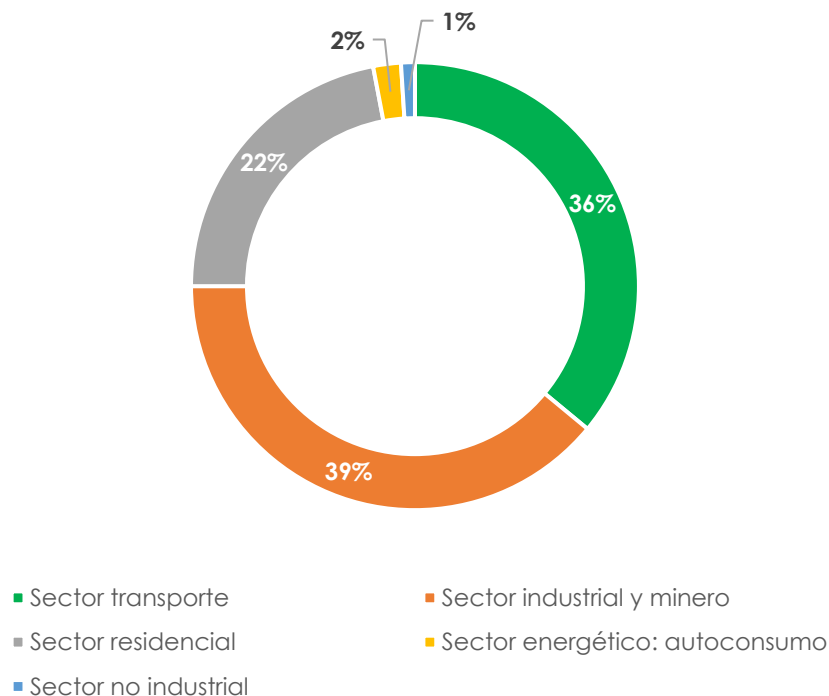


Figura 2 Consumo energético por sectores en Chile (CNE).

Consumo energético por regiones

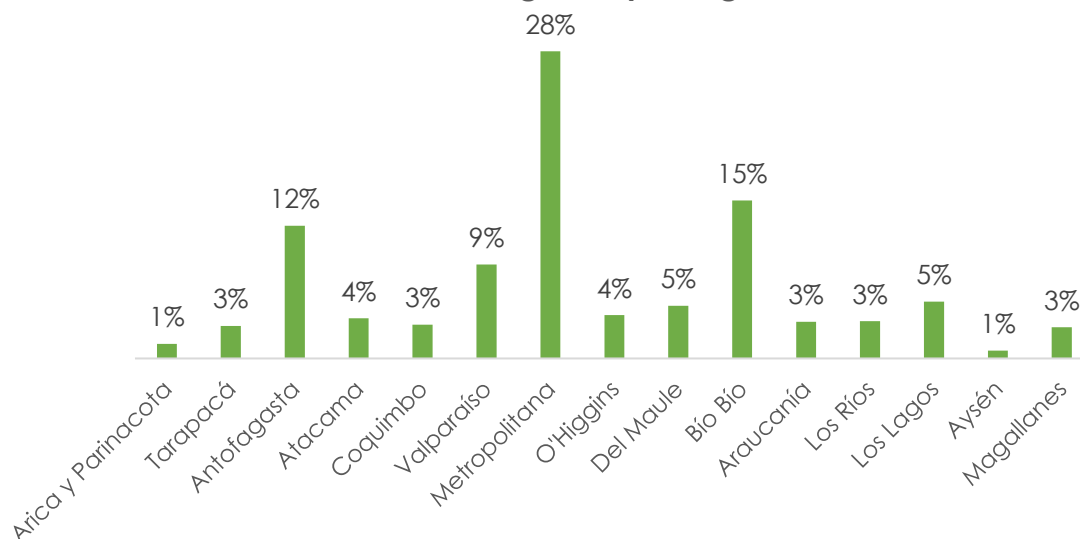


Figura 3 Consumo energético por Regiones, Chile (CNE).

Según la información de la IEA en el sector residencial a final del año 2017 se consumió la energía equivalente a 4.401 ktoe (kilo toneladas equivalentes en combustible). Si bien en el año 2014 se produjo un fuerte descenso, la curva de consumo ha recuperado la tendencia al alza [16], como se refleja en la Figura 4:

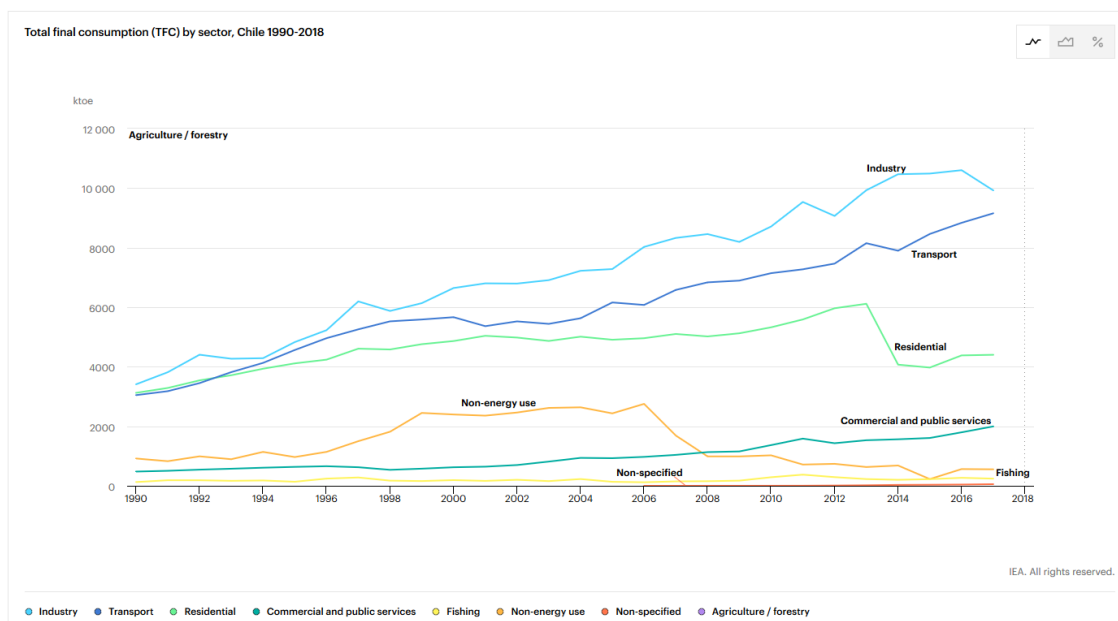


Figura 4 Total de energía final consumida en Chile (IEA) [16].

De acuerdo con el estudio presentado por Sanguinetti en el año 2013, en Chile, la energía consumida durante la fase de operación de las viviendas representa entre el 75% y el 80% de la huella energética de éstas [17].

1.2 EL SECTOR RESIDENCIAL EN CHILE

Según los datos publicados por el Observatorio Urbano, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU), tras el censo realizado en el año 2017, el 80% de las viviendas del país corresponden con la tipología de casa o vivienda unifamiliar [18] (ver Figura 5).

Tipología de viviendas en Chile (censo 2017)

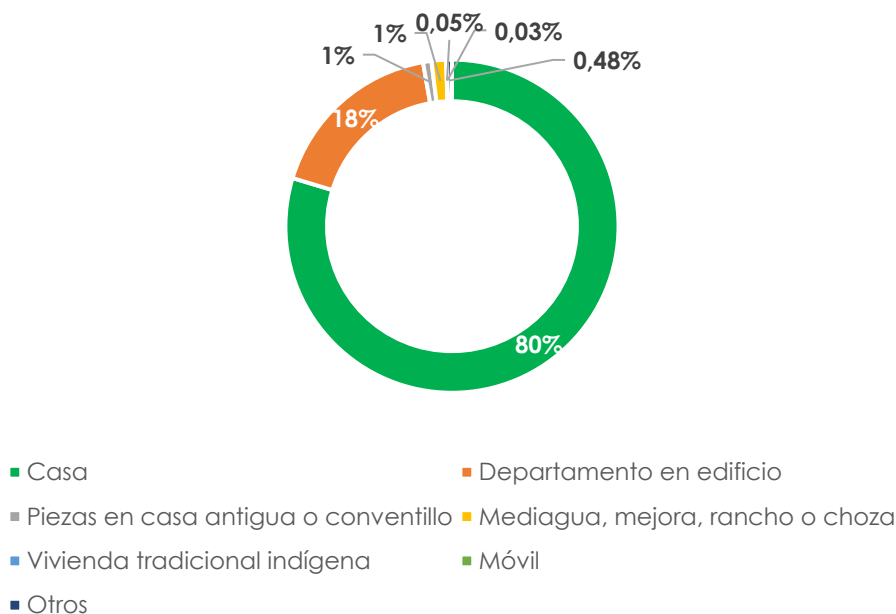


Figura 5 Distribución de las tipologías de vivienda en Chile (Censo 2017, INE) [18]

Chile manifiesta un déficit en la vivienda de interés social, el cual desde la década de 1950 hasta la actualidad se ha disminuido en más del 50%, pero a costa de sacrificios en la calidad y localización de las construcciones en beneficio de la cantidad [19]. Según la Cámara Chilena de la Construcción, de acuerdo con los resultados del censo de 2017, faltan 425.660 viviendas para terminar con el allegamiento y 313.943 viviendas para reemplazar las existentes en situación de deterioro [20].

Desde la década de 1980 en Chile, si bien los distintos gobiernos han ido introduciendo modificaciones y novedades en la política habitacional chilena, las tendencias se han mantenido estables [21] en:

- i. Producción masiva de viviendas nuevas con estándares mínimos de habitabilidad.
- ii. Consolidación de un sistema financiero basado en subsidios del Estado y ahorros del beneficiario, generando muchas veces créditos hipotecarios que provocan un gran endeudamiento familiar.
- iii. Políticas y programas habitacionales basados, en su mayoría, en oferta de licitaciones a grandes constructoras e inmobiliarias.
- iv. Inexistencia de interés real por hacerse cargo del problema en la construcción de viviendas nuevas.

De acuerdo con un estudio publicado por la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), el 0,50% de las estructuras residenciales son edificios y el 99,50% responde a la tipología de casas unifamiliares, correspondiéndose con 4.260.000 casas, cuyo tipo de construcción se distribuye de acuerdo con la UC como se muestra en la Figura 6 [22]:

Tipo de construcción de las casas

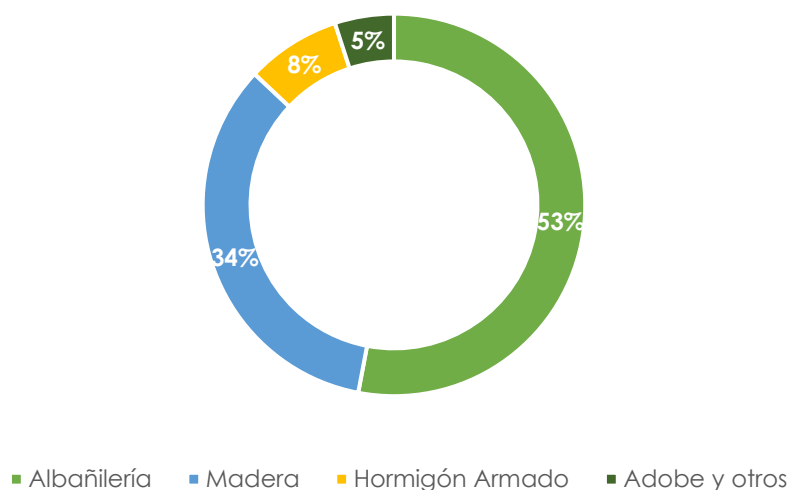


Figura 6 Tipo de construcción en las casas (PUC) [22].

A la vista de la información recopilada, se puede afirmar que, el tipo de construcción residencial predominante en Chile son las viviendas unifamiliares construidas en albañilería. Con la población concentrada en la zona centro del país, Regiones de

Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, concordando con el consumo energético reportado (ver Figura 3).

La construcción habitacional en Chile se ha desarrollado en un régimen de dispersión, sustentada por la iniciativa privada, a la cual pueden acceder los sectores más vulnerables del país gracias al régimen subsidiario del estado, ya sea en modo de vivienda social o subsidio parcial. Esta industria de la construcción se ha valido de la escasa regulación del suelo y servicios urbanos [2].

La calidad, tamaño y densidades de población de las viviendas subsidiadas y las de clase media-alta presentan mínimas diferencias [2]. En la Figura 7 se muestran distintos tipos de viviendas unifamiliares.

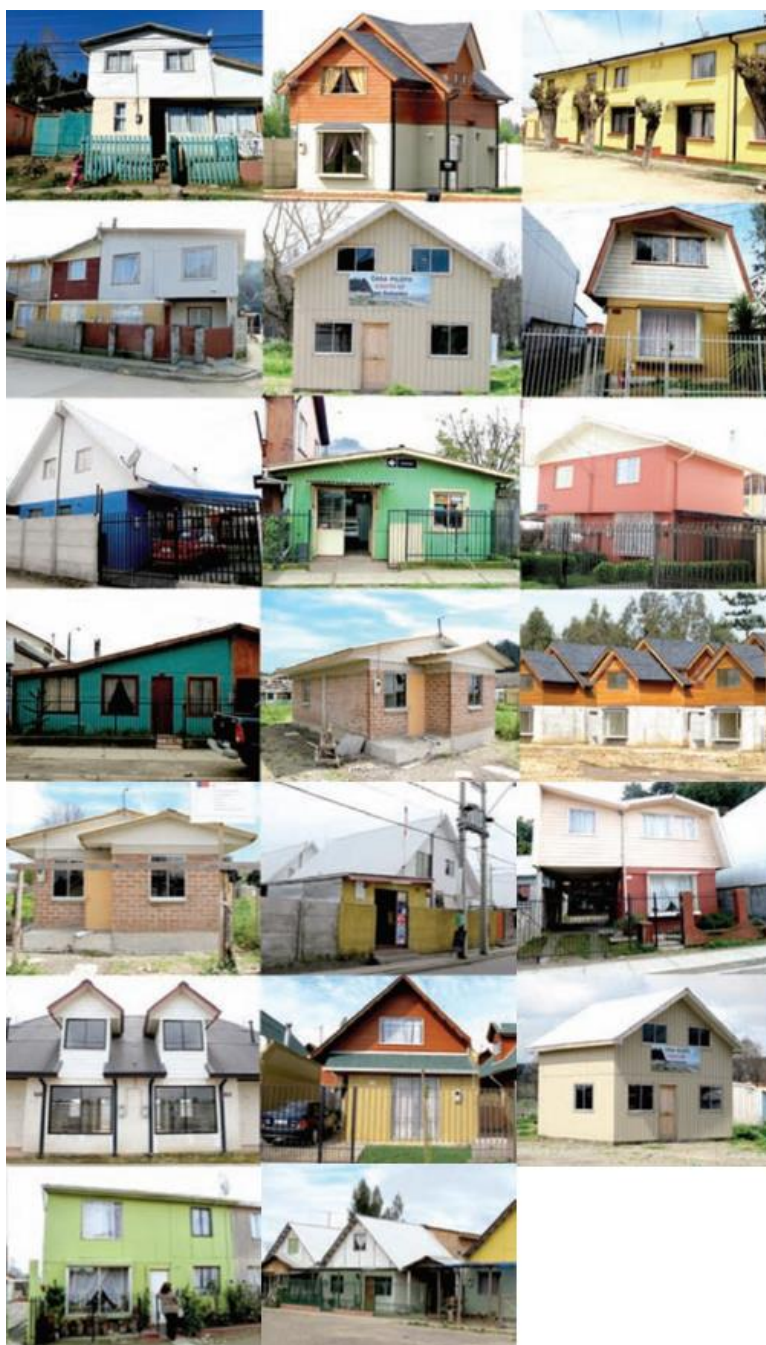


Figura 7 Tipología de viviendas objeto (Celis et al.) [2]

1.3 JUSTIFICACIÓN

En consecuencia, de la información recopilada, se identifica que en el sector de la construcción, a nivel mundial, se han de mejorar los sistemas constructivos a fin de reducir la huella energética que estos dejan en el entorno.

Esta huella energética procede de dos fuentes principales:

- i. La energía incorporada en los materiales utilizados para la construcción de las edificaciones.
- ii. La energía consumida, principalmente en calefactar los recintos durante su periodo de explotación o vida útil.

La necesidad del alto empleo de energía en calefacción es, en parte, consecuencia de un aislamiento ineficiente de los recintos en la envolvente del edificio.

Chile no está exento a esta situación. Paralelamente, el país cuenta con una situación de déficit de vivienda, la cual el Estado Chileno combate con viviendas de interés social a través de una política subsidiaria.

La tipología de vivienda predominante en las edificaciones residenciales chilenas son las casas unifamiliares, y dentro de éstas, las construidas en albañilería [22].

1.3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La construcción habitacional en Chile presenta deficiencias de aislamiento en su envolvente. Lo cual, sumado a los materiales utilizados en su construcción, aumenta considerablemente la huella energética de las viviendas.

Con el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se pretende buscar una solución de envolvente a las viviendas que permita reducir la huella energética de las viviendas de interés social en Chile, cumpliendo con los requisitos establecidos en la legislación y normativa vigentes.

Para lograr resolver el problema propuesto se empleará la Programación Lineal Entera.

1.3.2 METODOLOGÍA: PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA¹

En el desarrollo de este TFM se trabaja con una metodología de tipo investigativa. Para la resolución de los problemas planteados en su desarrollo se elige el empleo de la Programación Lineal Entera (PLE) dado que es una herramienta que permite modelizar matemáticamente los problemas planteados y se ha comprobado su eficacia en diferentes investigaciones [4, 6, 7, 11]. Las razones que fundamentan la elección de la PLE para la resolución del problema planteado son:

- i. Se trata de una técnica exitosamente aplicada en el campo de energía y construcciones [4].

¹ Se desarrolla en el apartado 1.6 una descripción más detallada de la Programación Lineal de Entera.

- ii. La minimización de la huella energética puede obtenerse con una función lineal y, las restricciones de construcción, presupuesto y conductividad térmica pueden modelarse como restricciones lineales.
- iii. Los tiempos de resolución con el uso del ordenador son considerablemente bajos [4].

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar, mediante el uso de la programación lineal entera, la combinación óptima de materiales, considerando el presupuesto establecido, que permita reducir lo máximo posible la huella energética de las edificaciones mejorando la eficiencia energética de las viviendas.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Estudiar la envolvente de las viviendas unifamiliares de interés social en Chile.
- ii. Identificar las combinaciones de materiales que permitan reducir la huella energética de la vivienda y mejorar la eficiencia energética de la vivienda.
- iii. Proponer un sistema constructivo que se adapte a las necesidades y recursos del país para la ejecución de viviendas de interés social.
- iv. Cumplir los requisitos del Manual de Reglamentación térmica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, mejorando el desempeño de la vivienda tipo.

1.5 ALCANCE

El desarrollo del TFM se verá condicionado a:

- i. El empleo de los materiales disponibles en el mercado chileno.
- ii. El cumplimiento de la normativa y legislación chilena.
- iii. El empleo del software disponible por la Universitat Politècnica de València para la resolución de los cálculos, Wolfram Mathematica (edición para estudiantes) y Excel Solver.
- iv. El cumplimiento de los presupuestos establecidos en los planes de subsidios del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile.

1.6 PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA

La Programación Lineal (PL) es una herramienta que permite la resolución de problemas de optimización matemática [23]. Su objetivo es, dada una situación, plantear un modelo matemático lineal que la represente y, a través de él, obtener la(s) solución(es) que optimice(n) dicha situación [24].

La situación representada a través de la programación lineal se modela a través de una función objetivo, de la cual se buscará su óptimo (máximo o mínimo), de n variables x_j relacionadas entre sí por un conjunto de m restricciones (ecuaciones o inecuaciones lineales) [25].

Supóngase:

$$J = \{1, 2, \dots, n\} \quad J = J_1 \cup J_2 \cup J_3 \text{ con } J_i \cap J_j = \emptyset \text{ si } i \neq j \quad (2)$$

$$I = \{1, 2, \dots, m\} \quad I = I_1 \cup I_2 \cup I_3 \text{ con } I_i \cap I_j = \emptyset \text{ si } i \neq j \quad (3)$$

De forma genérica, un problema de programación lineal se puede expresar de la siguiente forma:

$$(PL) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min (o Max)} \sum_{j \in J} c_j \cdot x_j \\ \text{Sujeto a:} \\ \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot x_j \geq b_i \quad \forall i \in I_1 \\ \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot x_j \leq b_i \quad \forall i \in I_2 \\ \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot x_j = b_i \quad \forall i \in I_3 \\ x_j \geq 0 \quad \forall j \in J_1, \quad x_j \leq 0 \quad \forall j \in J_2, \quad x_j \text{ no restringida } \forall j \in J_3 \end{array} \right. \quad (4)$$

Donde x_j ($j=1, \dots, n$) representa las variables del problema de programación lineal y, a_{ij} , c_j , b_i ($i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$) números reales dados.

Mediante cambios de signo se tiene que:

$$\text{Max } f(x) = -\text{Min}(-f(x))$$

Aplicando cambios de variables y lógica matemática un problema de programación lineal se puede expresar de forma matricial, en la cual su función objetivo siempre se minimiza:

$$(PL) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } c \cdot x \\ \text{sujeto a:} \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Donde:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}, c = (c_1, \dots, c_n), A = (a_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} \text{ y } 0 = 0_n. \quad (6)$$

En caso de que la situación a modelar exija que las variables sean enteras, se trata de un problema Programación Lineal Entera (PLE). Este es el caso más habitual en problemas relacionados con el rubro de la construcción.

De forma genérica, la resolución de un problema de PLE es considerablemente más compleja que la de un problema de PL, dado que para éstos no se ha de considerar la restricción de integridad de las variables, a diferencia de la PLE [25].

El método del SIMPLEX, descubierto por George B. Dantzing en 1947, es la técnica más empleada para la resolución de problemas de programación lineal [11]. Este método se basa en un algoritmo iterativo que permite resolver un PL. Consta de un paso de inicio, una regla de iteración y condición de detención [24]. Su función es la de buscar una solución inicial, comprobar si se trata de la óptima, en caso contrario, repetir un proceso

de modificación de la solución hasta encontrar el óptimo [24], como se ilustra en la Figura 8.

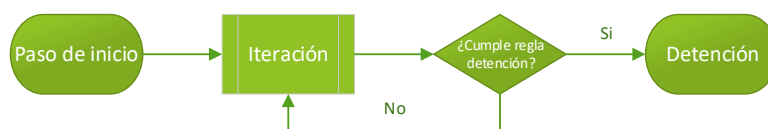


Figura 8 Diagrama de flujo del algoritmo SIMPLEX (propia).

1.6.1 SOFTWARES DE PROGRAMACIÓN LINEAL

En el mercado se encuentran diferentes programas o paquetes con los que resolver problemas de programación lineal, si bien se han propuesto diferentes algoritmos para la resolución de los problemas, el algoritmo del SIMPLEX ha sido el predominante en los distintos softwares del mercado [11].

Entre los diferentes programas informáticos disponibles se encuentran algunos como:

- i. **GUROBI:** software para optimización matemática para problemas de programación lineal y programación cuadrática, entre otros. Se trata de un programa disponible bajo licencia [26].
- ii. **General Algebraic Modeling System (GAMS):** este programa está diseñado para la resolución de problemas lineales y no lineales de optimización. Permite la construcción de grandes modelos que se adapten a nuevas circunstancias, al igual que GUROBI, se trata de un software disponible bajo licencia [27].
- iii. **Lingo:** es un software desarrollado por Lindo Systems para la resolución de modelos lineales y no lineales e integrales [28].
- iv. **Wolfram Mathematica:** se trata de un software matemático, desarrollado por Wolfram Research, aplicado en áreas de ciencia, ingeniería, informática y matemática, cuenta con un potente lenguaje de programación de propósito general [29].

2. CHILE: GEOGRAFÍA, LEGISLACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

2.1 GEOGRAFÍA

Geográficamente Chile es un país muy diverso, es tricontinental, la zona principal del territorio nacional se encuentra en Sur América, Isla de Pascua en la zona oriental de Oceanía (a 3.780 kilómetros de la costa continental) y el Territorio Antártico Chileno (de 2.006.626 kilómetros cuadrados), en la zona más austral del planeta.

Chile es una estrecha franja de tierra, franqueada por la Cordillera de los Andes por el este, y delimitada por el Océano Pacífico por el Oeste. En la Figura 9 se presenta un mapa geopolítico del país.

La superficie continental del país está formada por más de 756.626 kilómetros cuadrados, con una longitud de, desde la frontera con Perú hasta el Cabo de Hornos, de 4.270 kilómetros; presentando un ancho medio de 200 kilómetros.

La escasa distancia de la cordillera hasta la costa ha marcado la situación marítima del país, como consecuencia se cuenta con los puertos como llave para la conexión comercial [30].



Figura 9 Chile (Wikipedia)

2.1.1 ORGANIZACIÓN TERRITORIAL

Chile se encuentra organizado territorialmente en 15 regiones, las cuales se subdividen en un total de 50 provincias. Las primeras a cargo de un intendente y las segundas de un gobernador, siendo ambas autoridades designadas por la Presidencia de la República. De norte a sur, las regiones del país son [31]:

- i. Arica-Parinacota
- ii. Tarapacá
- iii. Antofagasta
- iv. Atacama
- v. Coquimbo
- vi. Valparaíso
- vii. Metropolitana
- viii. Del Libertador Bernardo O'Higgins
- ix. Maule
- x. Bío-Bío
- xi. Araucanía
- xii. Los Ríos
- xiii. Los Lagos
- xiv. Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo
- xv. Magallanes y la Antártica Chilena

2.2 CLIMA

Como consecuencia de la gran variedad geográfica del país, existe una gran variedad de climas a lo largo del territorio nacional.

Junto a la extensa longitud del país, la Cordillera de los Andes se posiciona como un factor determinante en el clima del país. Controla y regula el paso de masas de aire desde el lado argentino del continente. Desde el lado occidental, el Océano Pacífico ejerce como regulador de la climatología del país [32].

En el territorio chileno se pueden distinguir las siguientes regiones climáticas [32], atendiendo a la geografía del país:

- i. **Norte:** presenta climas áridos. En esta zona se localiza el Desierto de Atacama, el cual se caracteriza por ser el más árido del mundo.
- ii. **Centro:** el clima mediterráneo es el más común en esta zona, presentando inviernos lluviosos y veranos secos (aunque, en los últimos años ha existido una sequía prolongada). En las zonas costeras el efecto amortiguador del océano es más fuerte.
- iii. **Sur:** es la zona más húmeda del país. Presenta climas templados en la zona más meridional, llegando a climas de tundra y polares en las zonas de sur y de montaña. A lo largo de la costa se hace presente el clima oceánico.
- iv. **Antártida:** en el Territorio Antártico Chileno se combina el clima polar con el de tundra.
- v. **Isla de Pascua y Archipiélago Juan Fernández:** tropical.

2.3 NORMATIVA TÉRMICA

Atendiendo a la variedad geográfica y climática del país, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, en 2006, crea el Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica, en el cual se subdivide al país en 7 zonas térmicas², atendiendo a las necesidades según el clima al que se encuentran sometidas [33]. Las zonas se encuentran definidas en cada uno de los mapas que entrega el manual para cada región (ver Anexo 1: zonas térmicas).

La normativa térmica desarrollada por el MINVU es puntera a nivel latinoamericano, pero al compararla con estándares internacionales resulta mucho más permisiva, al exigir menores reducciones en la demanda energética de las construcciones [2].

La normativa térmica chilena considera la parte continental e insular del país excluyendo el Territorio Antártico. Esta clasificación se hace atendiendo al criterio de grados día de calefacción anuales, indicados en la Tabla 1, de acuerdo con el registro meteorológico histórico, para conseguir una temperatura de confort [2].

² Se ha de distinguir entre regiones y zonas climáticas. Las regiones climáticas distinguen zonas del país de acuerdo con su ubicación geográfica que presentan similitudes. Mientras que las zonas climáticas corresponden a la clasificación administrativa que se hace de las diferentes partes del país, atendiendo a las condiciones de humedad y temperatura. Dentro de una región se pueden encontrar diferentes zonas térmicas y una misma zona térmica puede estar presente en una o más regiones a la vez.

Tabla 1 Grados día anuales por zona térmica [2]

Grados día anuales por zona térmica (GDA)	
Zona	Grado día (anual, en base a 15°C)
1	$GDA \leq 500$
2	$500 < GDA \leq 750$
3	$750 < GDA \leq 1000$
4	$1000 < GDA \leq 1250$
5	$1250 < GDA \leq 1500$
6	$1500 < GDA \leq 2000$
7	$2000 < GDA$

Respecto a los elementos verticales de las edificaciones, la normativa térmica chilena solo se aplica a los muros perimetrales de las construcciones, es decir a aquellos que separan el interior del exterior, y solo se encuentran sometidas a ella las edificaciones de tipo habitacional [33], a diferencia del Código Técnico de la Edificación (CTE), que exige su aplicación a todo tipo de edificaciones [34].

El CTE español es más restrictivo, exigiendo unos estándares de confort similares para todo el territorio español, mientras que la normativa chilena presenta una alta variabilidad, siendo permisiva en las zonas más cálidas del país [2, 33, 34].

La norma térmica chilena agrupa las exigencias por techumbres, muros y pisos ventilados, para los cuales exige los límites de transmitancia y resistividad térmicas [33], indicados en la Tabla 2:

Tabla 2 Exigencias normativa térmica chilena (MINVU) [33]

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U [W/(m²K)]	Rt [(m²K)/W]	U [W/(m²K)]	Rt [(m²K)/W]	U [W/(m²K)]	Rt [(m²K)/W]
1	0,84	1,19	4,00	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,00	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,90	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,70	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,60	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,10	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,60	1,67	0,32	3,13

La normativa solo contempla exigencias respecto a la transmisión de energía térmica entre el interior y exterior de la vivienda³, pero no desarrolla especificaciones sobre cómo se han de realizar los sistemas constructivos, respecto al aislamiento, o de su masa respecto al interior [2].

2.4 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Como se explicó en el apartado 1.2, en Chile los tipos de construcción habitacional más frecuentes son en vivienda unifamiliar en albañilería de ladrillos y tabiquería de madera, con un 53% y un 34% respectivamente del parque habitacional existente.

A continuación, se procederá a describir en mayor detalle estos sistemas constructivos.

³ Las exigencias térmicas solo se aplican a edificios residenciales.

2.4.1 CONSTRUCCIÓN EN ALBAÑILERÍA

En las viviendas construidas en albañilería, sus muros están conformados de una capa principal, los ladrillos y, en numerosas ocasiones, esta es la única capa del muro. A fin de mejorar la estética de la vivienda, algunas incorporan una capa de terminación de mortero de cemento de entre 1 y 2 centímetros de espesor para lograr un acabado uniforme.

De acuerdo con la norma de albañilería armada de Chile, NCh1924, se entiende por albañilería como “material estructural que se obtiene con unidades de albañilería ordenadas en hiladas según un aparejo prefijado y unidas con mortero” [35].

Las unidades de albañilería son ladrillos que pueden ser [36]:

- i. **Ladrillos macizos:** ladrillos sin perforaciones, por lo general de fabricación artesanal (ver Figura 10).
- ii. **Ladrillos huecos:** ladrillos industrializados perforados para uso en confección de tabiques livianos no estructurales (ver Figura 11).
- iii. **Ladrillos perforados:** de fabricación industrializada, ladrillos con huecos cuyo volumen es inferior al 50% del volumen total de arcilla (ver Figura 12).



Figura 10 Ladrillo macizo [36]



Figura 11 Ladrillo hueco [36]



Figura 12 Ladrillo perforado [36]

De acuerdo con el sistema constructivo utilizado, se distinguen tres tipos de construcción en albañilería [35]:

- i. **Albañilería armada:** “albañilería que lleva incorporados refuerzos de barras de acero en los huecos verticales y en las juntas o huecos horizontales de las unidades” (ver Figura 13).
- ii. **Albañilería confinada:** “albañilería que está enmarcada por pilares y cadenas de hormigón armado” (ver Figura 14).
- iii. **Albañilería semi-armada:** “albañilería que lleva incorporados refuerzos de barras de acero en los huecos verticales y/o en las juntas o huecos horizontales de las unidades, pero que no cumple los requisitos mínimos de refuerzo”.



Figura 13 Construcción en albañilería armada (propia)

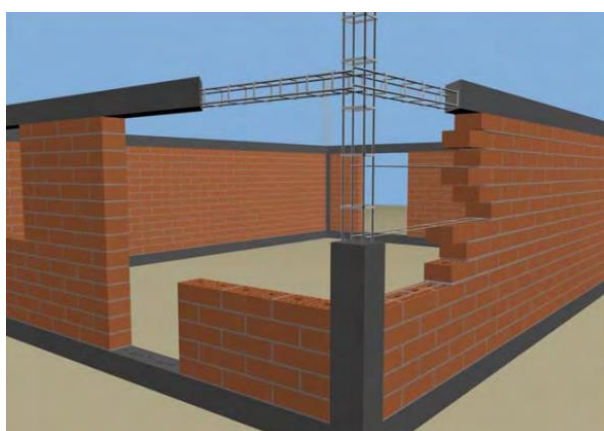


Figura 14 Albañilería confinada [36]

2.4.2 CONSTRUCCIÓN EN TABIQUERÍA

La construcción de viviendas de tabiques en Chile se hace con dos materiales: madera y perfiles de acero galvanizado.

Estos sistemas de tabiques ligeros presentan la ventaja de que además de construirse in situ en obra, se pueden fabricar en industrias o en talleres de las propias empresas constructoras [37].

Dependiendo de las características que presente el tabique, estos pueden clasificarse en [38]:

- i. **Tabique interior:** tabique que separa ambientes interiores de una edificación, que no se encuentra sometido a las inclemencias del medio ambiente.
- ii. **Tabique exterior:** separa el interior del exterior de la edificación, por lo que una de sus caras estará expuesta al medio ambiente.
- iii. **Tabique perimetral:** tabique perteneciente a la envolvente de la edificación o de una unidad funcional, puede ser interior o exterior.
- iv. **Tabique solidario:** tabique diseñado para seguir la deformación de la estructura.
- v. **Tabique flotante:** tabique diseñado para que se deforme independiente de la estructura.
- vi. **Tabique reticulado:** tabique con entramado de soporte o estructura resistente basada en perfiles, recubierto con revestimiento.
- vii. **Tabique autoportante:** tabique que no requiere de una estructuración interna o externa adicional que soporte su peso.
- viii. **Tabique no portante:** tabique que delimita recintos, pero que no forma parte de la estructura de la edificación.

2.4.2.1 TABIQUERÍA DE MADERA

Se trata de paneles formados por un bastidor hecho de perfiles de madera, siendo el perfil más común el de 2"x3" de sección, pino impregnado (ver Figura 15). Estos bastidores llevan por cada lado un revestimiento que les proporciona rigidez y arriostamiento [37].

Cada panel lleva incorporado la instalación eléctrica, sanitaria, aislación térmica, barreras de vapor y humedad, puertas y ventanas. Se ejecutan en obra las uniones entre sí y los anclajes a las cimentaciones [37].



Figura 15 Tabiquería de madera (habitissimo.cl)

2.4.2.2 TABIQUERÍA DE ACERO GALVANIZADO

De manera análoga a la madera, en Chile se construyen edificaciones en tabiquería con perfiles de acero galvanizado (ver Figura 16).

Los principales elementos estructurales de este sistema son los perfiles C (canal estructural o atiesada) y perfiles U (canal) [39].



Figura 16 Tabiquería de perfiles de acero galvanizado (cintac.cl)

2.5 SUBSIDIOS

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en sus políticas de desarrollo urbano, dispone de subsidios que permiten la adquisición o construcción de viviendas.

El Decreto Supremo (DS) N°1 de 2011 aprueba el Reglamento del Sistema Integrado de Subsidio Habitacional [40]. Para el caso de construcción de viviendas en sitio propio, el DS N°1 establece los montos en Unidades de Fomento⁴ (UF) indicados en la Tabla 3:

Tabla 3 Montos de subsidios para construcción en sitio propio según DS N°1 [40]

Emplazamiento de la vivienda	Precio vivienda UF	Subsidio UF	Ahorro mínimo
1. Todas las regiones, provincias y comunas del país, excepto las señaladas en 2. y 3.	Hasta 1.400	520	
2. Viviendas emplazadas en las Regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá, de Antofagasta, de Atacama y provincia de Chiloé.		600	30
3. Viviendas emplazadas en las regiones de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, de Magallanes y Antártica Chilena; provincia de Palena; comunas de la Isla de Pascua y de Juan Fernández	Hasta 1.600	700	

Si bien el estado aporta 520 UF, 600 UF o 700 UF según sea el caso, las viviendas ejecutadas a través de esta modalidad pueden tener un presupuesto de ejecución de hasta 1.400 UF o 1.600 UF en función de dónde se encuentren. La diferencia entre el monto del subsidio y el presupuesto final habrá de ser cubierta por los propios beneficiarios del subsidio o, en su defecto, por un tercero. Para poder beneficiarse de estos subsidios estatales, los beneficiarios han de aportar un ahorro mínimo de 30 UF, independiente del emplazamiento de la vivienda a construir, de forma que se parte de un presupuesto de ejecución mínimo de 550 UF.

2.6 CONCLUSIONES

Tras lo expuesto en el presente capítulo, se decide que el análisis de este TFM se realizará sobre una vivienda unifamiliar emplazada en la zona central del país, dado que se corresponde con la tipología de vivienda más común y la zona con mayor concentración de población del país.

En la zona centro del país, la zona climática predominante es la número 2, por lo que se tomarán sus parámetros para la modelización general.

⁴ La Unidad de Fomento es una moneda existente no física chilena. Su objetivo es ajustar las transacciones comerciales, contables y bancarias de acuerdo con variación de la inflación. Fue creada en el año 1967, durante el gobierno de Eduardo Frei Montalva [41]. Su valor diario en Pesos Chilenos (CLP), moneda de curso oficial el país, lo entrega el Servicio de Impuestos Internos (SII) del país, para el día actual y a un mes vista, además de disponer del registro histórico [42].

3. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN

3.1 PLANTEAMIENTO Y MODELIZACIÓN

El objetivo del trabajo es encontrar la combinación de materiales que permita la mayor reducción de la huella energética de la vivienda. En específico se estudian los materiales que conforman la envolvente de la vivienda, considerando los muros de fachada y la cubierta. Se minimizará la huella energética de la envolvente de la vivienda.

Ya que los datos de huella energética vienen dados por kilogramo de material, conocida la masa de material por unidad de superficie y considerando que tanto los muros de fachada como la cubierta de la vivienda tienen una superficie determinada, multiplicando por las superficies de envolvente opaca se tendrá la huella energética total.

Para una mejor comprensión de la formulación, se presentan las variables y parámetros utilizados:

- i. Sean S_M la superficie opaca de los muros de fachada y S_C la superficie opaca correspondiente a la cubierta.
- ii. Sea n el número de capas de la envolvente de la vivienda, donde cada capa $i \in \{1, \dots, n\}$ está hecha de uno de los m_i materiales disponibles para dicha capa, el material $j \in \{1, \dots, m_i\}$ se encuentra disponible en r_{ij} espesores comerciales. Se considera n el número total de capas de envolvente de la vivienda, donde l son las capas del muro de fachada y l' el número de capas correspondientes a la cubierta de la vivienda, como se refleja en la ecuación (7):

$$n = l + l' \quad (7)$$
- iii. Para cada $i \in \{1, \dots, n\}$, $j \in \{1, \dots, m_i\}$ y $k \in \{1, \dots, r_{ij}\}$ se definen los siguientes parámetros:
 - a. Sea $k_{i,j,k}$ la masa en kg en la capa i , del material j , en espesor k en 1m^2 .
 - b. Sea $E_{i,j}$ la huella energética en MJ por cada kg de material j en la capa i .
 - c. Sea $t_{i,j,k}$ el valor del espesor k , del material j en la capa i .
 - d. Sea $c_{i,j,k}$ el coste de 1m^2 de material j , de espesor k en la capa i .
- iv. El espesor de la envolvente estará determinado entre un valor mínimo, T_{Mmin} (para el muro) y T_{Cmin} (para la cubierta), y un valor máximo, T_{Mmax} (para el muro) y T_{Cmax} (para la cubierta).
- v. Sean U_{Mmax} la transmitancia máxima permitida para el muro de fachada y U_{Cmax} la transmitancia máxima permitida en la cubierta. Partes opacas, en ambos casos.
- vi. Sea P_{max} el presupuesto límite admitido para la construcción.
- vii. Se pueden dar incompatibilidades entre materiales para dos capas contiguas.
- viii. Las variables $x_{i,j,k}$ de este PLE son de tipo binario. 1 indica que la capa i está hecha del material j en el espesor k . 0 en el caso contrario.
- ix. Para un material j en una capa i , sea λ_j su conductividad térmica. La restricción lineal para cumplir con el límite de transmitancia térmica es [4]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} \frac{t_{i,j,k}}{\lambda_j} \geq \frac{1}{U_{max}} - \frac{1}{h_{int}} - \frac{1}{h_{ext}} \quad (8)$$

Donde:

- a. $U_{max} \in \{U_{Mmax}, U_{Cmax}\}$.

- b. h_{int} : conductividad térmica superficial interior ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$).
 c. h_{ext} : conductividad térmica superficial exterior ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$).

La minimización de la huella energética de la envolvente de la vivienda puede ser formulado como un PLE, definido en las ecuaciones (9) a (17):

$$\text{Minimizar } S_M \cdot \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} E_{i,j} \cdot k_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} + S_C \cdot \sum_{i=l+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} E_{i,j} \cdot k_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} \quad (9)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (10)$$

$$S_M \cdot \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} c_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} + S_C \cdot \sum_{i=l+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} c_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} \leq P_{max} \quad (11)$$

$$T_{Mmin} \leq \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} t_{i,j,k} x_{i,j,k} \leq T_{Mmax} \quad (12)$$

$$T_{Cmin} \leq \sum_{i=l+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} t_{i,j,k} x_{i,j,k} \leq T_{Cmax} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} \frac{t_{i,j,k}}{\lambda_j} \geq \frac{1}{U_{Mmax}} - \frac{1}{h_{int}} - \frac{1}{h_{ext}} \quad (14)$$

$$\sum_{i=l+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} \frac{t_{i,j,k}}{\lambda_j} \geq \frac{1}{U_{Cmax}} - \frac{1}{h_{int}} - \frac{1}{h_{ext}} \quad (15)$$

$$x_{i,j,k} + x_{(i+1),j',k'} \leq 1 \quad \forall (i, j, k - (i+1), j', k') - incompatible \quad (16)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, m_i\}, k \in \{1, \dots, r_{ij}\} \quad (17)$$

Dónde:

- i. La Ecuación (9) representa la función objetivo, total de la huella energética de la vivienda en MJ.
- ii. La Ecuación (10) garantiza que cada capa está compuesta únicamente por un material.
- iii. La Ecuación (11) asegura que no se exceda el presupuesto límite del proyecto.
- iv. La Ecuación (12) es la restricción de espesor del muro de fachada.
- v. La Ecuación (13) limita el espesor de la cubierta.
- vi. La Ecuación (14) asegura que no se supere el límite de la transmitancia térmica en los muros de fachada.
- vii. La Ecuación (15) garantiza que no se excedan los límites establecidos de transmitancia térmica para la cubierta.
- viii. La Ecuación (16) impide que el material j' con el espesor k' aparezca en la capa siguiente a la capa i conteniendo el material j con el espesor k . Como máximo uno de estos dos materiales aparece en la capa correspondiente. Esta restricción se emplea para garantizar que dos materiales incompatibles entre sí estén en capas contiguas.
- ix. La Ecuación (17) define las variables del problema como binarias.

3.2 CASO DE ESTUDIO

El estudio se realiza sobre una vivienda de interés social tipo, para la cual se tomarán dos secciones de la zona opaca de la envolvente de la vivienda, una para los muros de fachada y otra para la cubierta.

Para estas secciones se estudiarán diferentes propuestas de hasta 8 diferentes capas, como se indica en la Figura 17, para cada una, atendiendo a soluciones y sistemas constructivos reales que aporten propuestas interesantes al escenario planteado.

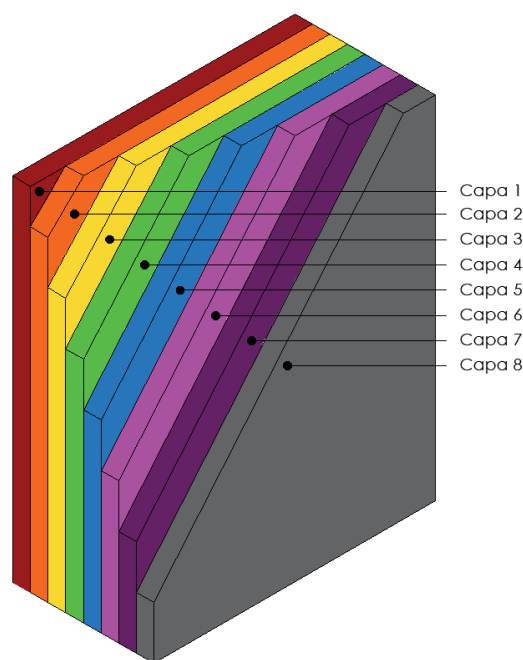


Figura 17 Detalle constructivo del caso de estudio (propia).

Las funciones de estas capas, pudiendo variar según la solución constructiva, serán:

- i. **Capa 1:** revestimiento exterior ornamental (opcional).
- ii. **Capa 2:** revestimiento exterior o elemento estructural portante.
- iii. **Capa 3:** capa de aislamiento.
- iv. **Capa 4:** elemento estructural portante o aislamiento.
- v. **Capa 5:** capa de aislamiento.
- vi. **Capa 6:** elemento estructural auxiliar no portante o aislamiento.
- vii. **Capa 7:** revestimiento interior.
- viii. **Capa 8:** revestimiento interior ornamental (opcional).

3.2.1 VIVIENDA TIPO

Para el desarrollo de este estudio se ha trabajado con una vivienda de interés social real, en concreto con una vivienda ejecutada en la ciudad de Villa Alemana, perteneciente a la Región de Valparaíso de la zona central del país, correspondiente a la zona térmica número 2.

Esta vivienda fue desarrollada por el Arquitecto Gerardo Andrade, ejecutada en el proyecto "Comité Amigos y Frontera" entre los años 2017 y 2018, patrocinado por la EGR

Quinta Servicios Ltda. y financiado por SERVIU, dentro de sus programas para combatir la falta de parque habitacional presente en el país.

Se muestran en la Figura 18 la planta arquitectónica de la vivienda, en la Figura 19 la planta de cubierta y en la Figura 20 los alzados de ésta.

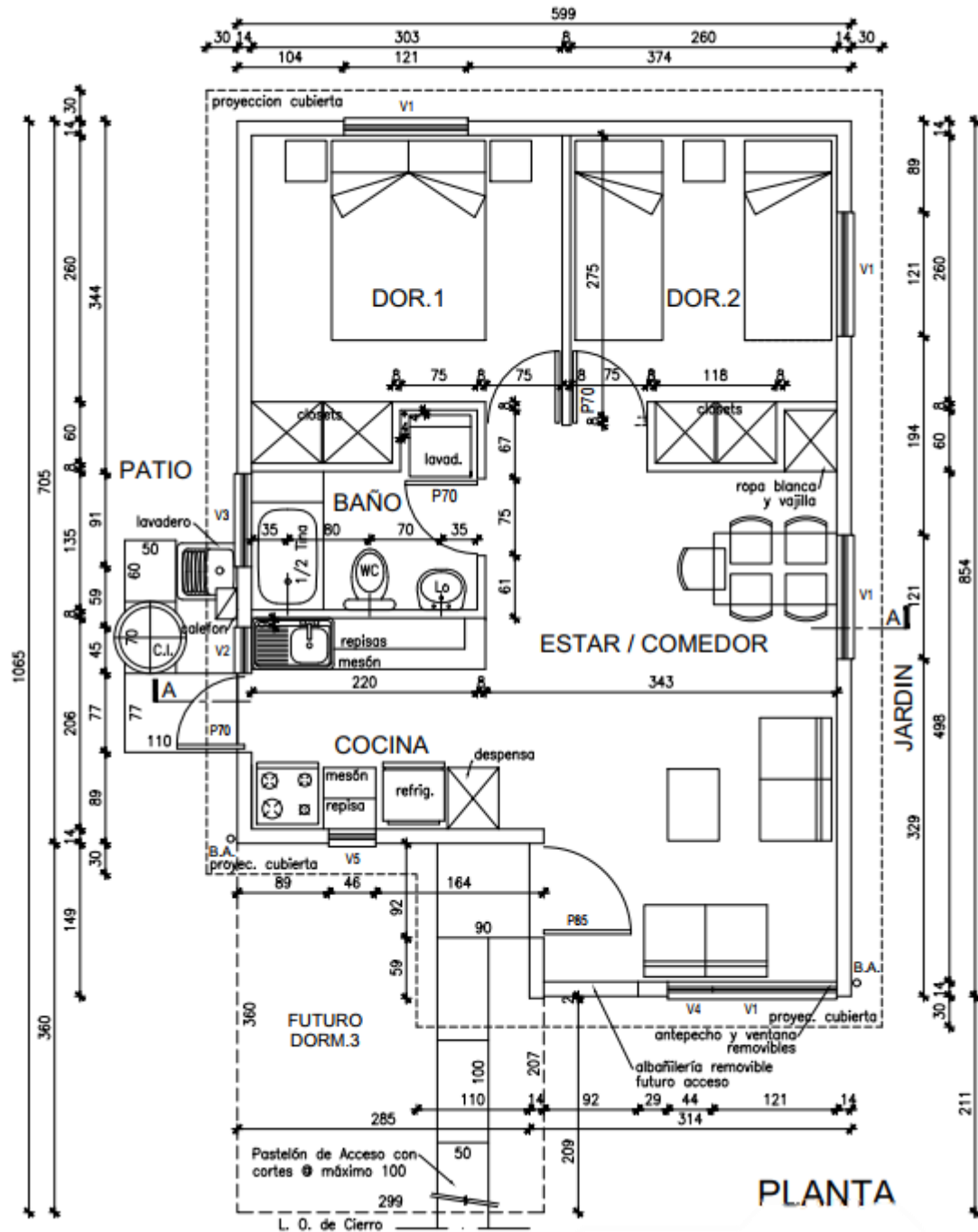
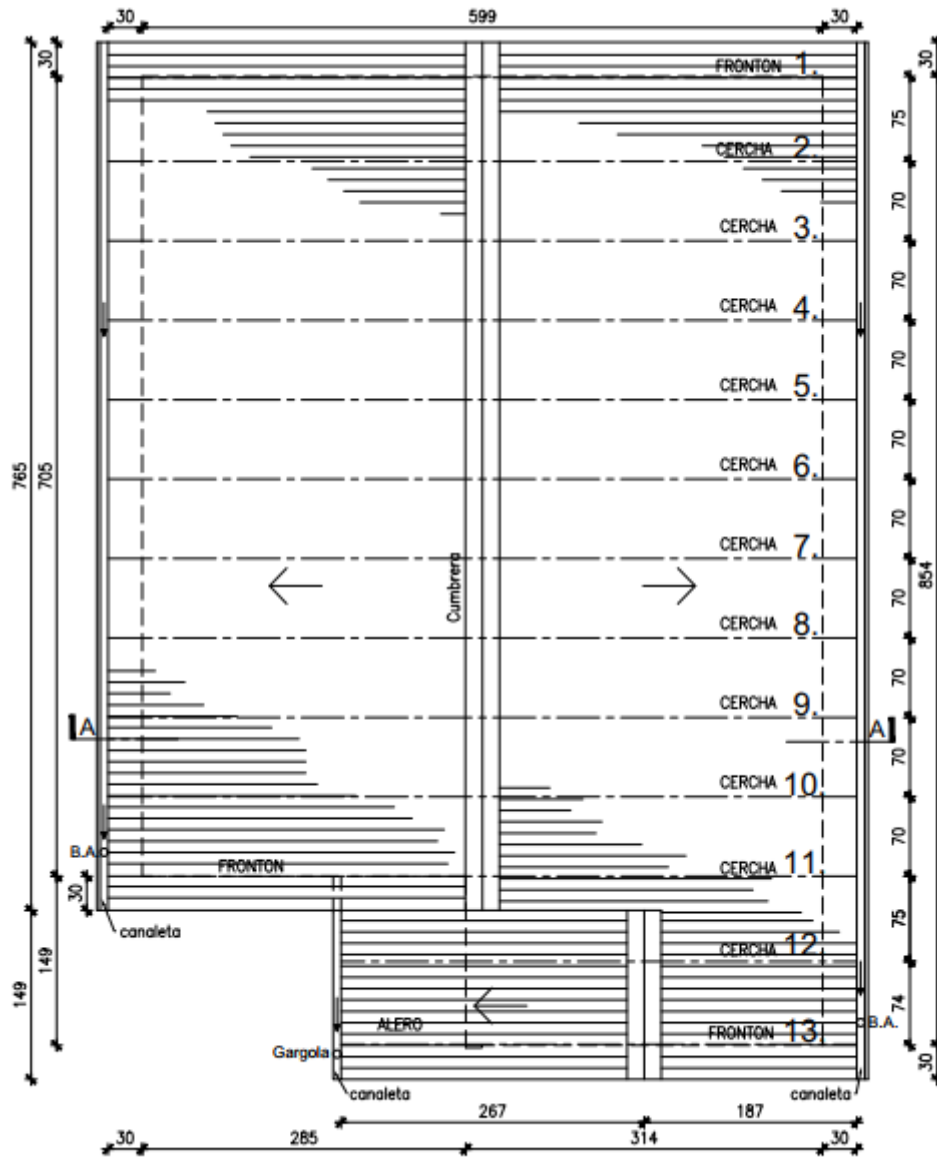


Figura 18 Planta de arquitectura (Quinta Servicios Ltda.)



PLANTA CUBIERTA

Figura 19 Planta de cubierta (Quinta Servicios Ltda.)

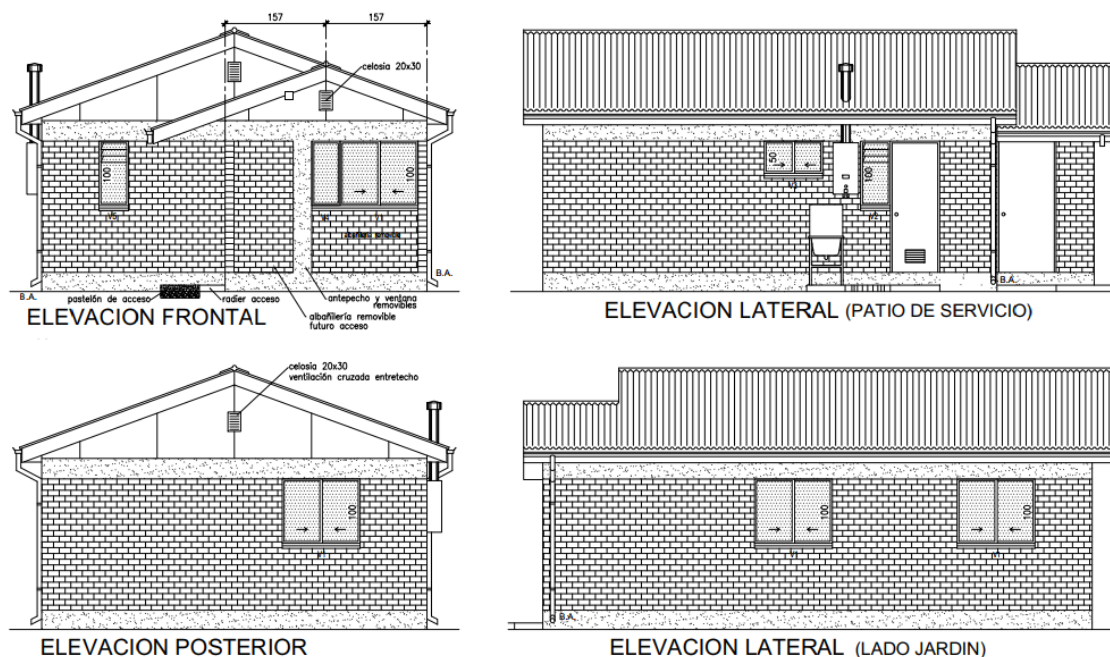


Figura 20 Elevaciones (Quinta Servicios Ltda.)

La vivienda analizada presenta una superficie opaca de muros de **77,91 m²** y de cubierta de **60,83 m²**.

Los muros perimetrales de la vivienda tipo están compuestos por una única capa de albañilería armada y, en el caso de la cubierta, su estructura se realiza en base a cerchas de madera y cubierta de planchas de zinc ondulado.

3.3 MATERIALES

Para el cálculo se han considerado los materiales presentes en el mercado chileno, con las siguientes consideraciones:

- i. Se toman como referencia los precios establecidos en la *Tabla Referencial de Precios Unitarios*⁵ del SERVIU [43].
- ii. Para materiales que no se encontraron disponibles en el listado SERVIU, se les tomó el precio lista del proveedor, se quitó el IVA y se pasó a UF, de acuerdo a la tabla facilitada por el SII [42].
- iii. Mediante el empleo de la herramienta *Procasaclima 2018 versión 1.1* [44] se obtienen los siguientes parámetros de los materiales considerados en el presente trabajo:
 - a. **λ**: conductividad térmica, medida en [W/(m·K)].
 - b. **ρ**: densidad, medida en [kg/m³].
 - c. **c**: calor específico, medido en [kJ/(kg·K)].
 - d. **μ**: coeficiente de permeabilidad al vapor.
 - e. **κ**: capacidad de absorción de agua por kg de material, medida en [kg/kg].
 - f. Tiempo de uso, medido en años.

⁵ El listado de precios oficiales del SERVIU se encuentra en UF, sin IVA, considerando medios auxiliares y mano de obra para la colocación de los materiales, cuya última actualización fue en 2017.

- g. **GWP:** índice GWP⁶ (Global Warming Potencial), medido en [kg CO₂e/kg].
- h. **GWP proceso:** índice GWP asociado al proceso de colocación del material, medido en [kg CO₂e/kg].
- i. **AP:** potencial de acidificación⁷, medido en [kg SO₂e/kg].
- j. **PEI:** huella energética o energía incorporada (primary energy input) asociada al material, medido en [MJ/kg].

De todos los parámetros que facilita el programa, para el presente TFM se emplearán la huella energética de los materiales y su conductividad térmica, pero se quiere dejar constancia de que se dispone de toda esta información que permitiría establecer nuevas restricciones relacionadas con los diferentes parámetros ambientales o energéticos que la requirieran.

Los materiales y soluciones constructivas considerados para el presente estudio son:

- i. Muros de fachada:
 - a. Aislamiento:
 - 1. Poliestireno expandido 1,2x0,6m x 50mm 10kg/m³.
 - 2. Poliestireno expandido 1,2x0,6m x 80mm 10kg/m³.
 - 3. Lana de vidrio R122 35 kg/m³.
 - b. Estructura:
 - 1. Ladrillo perforado.
 - 2. Ladrillo macizo.
 - 3. Perfil U 2x4x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 - 4. Perfil C 2x4x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 - 5. Perfil omega 35x38x12x8x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 - 6. Estribo de acero 8 mm A-44 6m.
 - 7. Pino impregnado cobre 2"x3"x3,2m.
 - 8. Pino impregnado cobre 2"x2"x3,2m.
 - 9. Canastillo armadura 15x15cm x 3m.
 - 10. Hormigón.
 - c. Revestimiento interior:
 - 1. Yeso cartón (yeso laminado) 120x240cm x 8mm.
 - 2. Yeso cartón (yeso laminado) 120x240cm x 10mm.
 - 3. Yeso cartón (yeso laminado) 120x240cm x 15mm.
 - 4. Enlucido de yeso.
 - d. Terminación:
 - 1. Pintura (dos manos).
 - e. Revestimiento exterior:
 - 1. Placa de fibrocemento 120x240cm x 8mm.
 - 2. Placa de fibrocemento 120x240cm x 6mm.
 - 3. Pintura (dos manos).
- ii. Cubierta:
 - a. Aislamiento:
 - 1. Poliestireno expandido 1,2x0,6m x 50mm 10kg/m³.

⁶ Mediante el índice GWP se mide la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera por cada unidad de producción de material.

⁷ El índice AP mide la cantidad de SO₂ emitido al medio ambiente por cantidad de material.

2. Poliestireno expandido 1,2x0,6m x 80mm 10kg/m³.
3. Lana de vidrio R122 35 kg/m³.
- b. Barrera contra la humedad:
 1. Filtro asfáltico 15 lb.
- c. Estructura:
 1. Perfil U 2x4x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 2. Perfil C 2x4x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 3. Perfil omega 35x38x12x8x0,85 Metalcon (acero galvanizado) estructural.
 4. Pino impregnado cobre 2"x3"x3,2m.
 5. Pino impregnado cobre 2"x2"x3,2m.
- d. Revestimiento exterior:
 1. Plancha acanalada onda zinc 0,35x851x3000mm.
 2. Teja.

Se presenta en el Anexo 2: tabla de materiales, los materiales tabulados con sus respectivos precios comerciales, parámetros entregados por la aplicación *Procasaclima* y fuente de recolección de los datos.

3.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La envolvente de estudio está compuesta por hasta 8 capas en el problema planteado, pero constructivamente hablando, carece de sentido plantear como, por ejemplo, para la capa de estructura, un bloque macizo de acero galvanizado o solo de hormigón masa, se consideran las soluciones constructivas reales para determinar la cantidad efectiva de material por unidad de superficie.

En consecuencia a lo anterior, se determinan que las variables a utilizar en el problema de PLE obedecerán a las soluciones constructivas empleadas en obra y no exclusivamente al material teórico.

Considerando que para el presente TFM se plantean las variables binarias x_{ijk} , que representan a la capa i , hecha del material j en el espesor k . Se tiene que para los valores de $i = \{1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8\}$ se trata capas correspondientes a los muros de fachada y, para los valores de $i = \{9; 10; 11; 12; 13\}$. Cada una de dichas capas se corresponde con:

1. Terminación exterior de muros.
2. Revestimiento exterior de muros.
3. Estructura de muros.
4. Cámara de aire muros.
5. Aislamiento térmico muros.
6. Estructura secundaria muros (para sujeción de revestimiento interno).
7. Revestimiento interior de muros.
8. Terminación interior de muros.
9. Revestimiento exterior de cubierta.
10. Barrera de protección contra la humedad de cubierta.
11. Cámara de aire de cubierta.
12. Aislamiento térmico cubierta.
13. Estructura de cubierta.

Para cada una de las mencionadas capas se han considerado los materiales presentados en la Tabla 4, de acuerdo con el mercado y sector de la edificación chilena, con sus respectivas propiedades:

- i. **Variable:** variable en el modelo matemático.
- ii. **Material:** nombre del material.
- iii. **Espesor (t):** espesor del material, medido en milímetros.
- iv. **Coste:** Coste del material por unidad de superficie, medido en [UF] por unidad de superficie, descontando el IVA.
- v. **Transmitancia térmica (λ):** transmitancia del material medida en [W/(m·K)].
- vi. **t/ λ :** cociente del espesor partido por la transmitancia del material, parámetro empleado en las ecuaciones (14) y (15), restricciones que imponen el cumplimiento de los límites establecidos en el manual de reglamentación térmica del MINVU.

Tabla 4 Materiales propuestos (propia)

Variable PL	Material	Espesor (t) [mm]	Coste sin IVA [UF]	Conductividad Térmica (λ) [W/(m·K)]	t/ λ [m ² ·K/W]
X _{1,1,1}	Pintura 2 manos	0,20	0,09	0,6000	0,0003
X _{1,2,1}	Revestimiento Vynil Siding exterior PVC	8,00	0,18	0,1900	0,0421
X _{2,1,1}	Placa de fibrocemento 120x240cm x 8mm + fieltro	8,00	0,25	0,5800	0,0138
X _{2,1,2}	Placa de fibrocemento 120x240cm x 6mm + fieltro	6,00	0,23	0,5800	0,0103
X _{3,1,1}	Albañilería armada	140,00	0,41	0,3600	0,3889
X _{3,2,1}	Albañilería confinada	140,00	0,41	1,0000	0,1400
X _{3,3,1}	Tabique metalcon	40,00	0,13	60,0000	0,0007
X _{3,4,1}	Tabiquería de madera	76,20	0,13	0,1500	0,5080
X _{4,1,1}	Camára de aire ligeramente ventilada 30mm	30,00	-	0,0800	0,3750
X _{4,1,2}	Camára de aire ligeramente ventilada 50mm	50,00	-	0,0900	0,5556
X _{4,1,3}	Camára de aire ligeramente ventilada 80mm	80,00	-	0,0900	0,8889
X _{4,1,4}	Camára de aire ligeramente ventilada 100mm	100,00	-	0,0900	1,1111
X _{4,1,5}	Camára de aire no ventilada 30mm	30,00	-	0,1700	0,1765
X _{4,1,6}	Camára de aire no ventilada 50mm	50,00	-	0,1800	0,2778
X _{4,1,7}	Camára de aire no ventilada 80mm	80,00	-	0,1800	0,4444
X _{4,1,8}	Camára de aire no ventilada 100mm	100,00	-	0,1800	0,5556
X _{5,1,1}	Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m ³	50,00	0,16	0,0410	1,2195

Tabla 4 (continuación)

Variable PL	Material	Espesor (t) [mm]	Coste sin IVA [UF]	Conductividad Térmica (λ) [W/(m K)]	t/λ [m ² K/W]
X5,2,1	Lana de vidrio R122 35 kg/m ³	50,00	0,09	0,0400	1,2500
X5,1,2	Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m ³	80,00	0,07	0,0410	1,9512
X6,1,1	Tabique metalcon	40,00	0,13	60,0000	0,0007
X6,2,1	Tabiquería de madera	76,20	0,13	0,1500	0,5080
X6,2,2	Tabiquería madera 2x2	50,80	0,04	0,1500	0,3387
X7,1,1	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm + enlucido	11,50	0,21	0,2100	0,0548
X7,1,2	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm + enlucido	16,50	0,22	0,2100	0,0786
X7,1,3	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm + enlucido	9,50	0,19	0,2100	0,0452
X7,2,1	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm	10,00	0,08	0,2100	0,0476
X7,2,2	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm	15,00	0,09	0,2100	0,0714
X7,2,3	Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm	8,00	0,06	0,2100	0,0381
X8,1,1	Pintura 2 manos	0,20	0,09	0,6000	0,0003
X9,1,1	Plancha acanalada onda zinc 0,35x851x3000	0,35	0,12	200,0000	0,0000
X9,2,1	Teja	14,00	0,35	1,0000	0,0140
X10,1,1	Fieltro asfáltico	0,50	0,00	0,2300	0,0022
X11,1,1	Camára de aire ligeramente ventilada 30mm	30,00	-	0,0800	0,3750
X11,1,2	Camára de aire ligeramente ventilada 50mm	50,00	-	0,0900	0,5556
X11,1,3	Camára de aire ligeramente ventilada 80mm	80,00	-	0,0900	0,8889
X11,1,4	Camára de aire ligeramente ventilada 100mm	100,00	-	0,0900	1,1111
X11,1,5	Camára de aire no ventilada 30mm	30,00	-	0,1700	0,1765
X11,1,6	Camára de aire no ventilada 50mm	50,00	-	0,1800	0,2778
X11,1,7	Camára de aire no ventilada 80mm	80,00	-	0,1800	0,4444
X11,1,8	Camára de aire no ventilada 100mm	100,00	-	0,1800	0,5556

Tabla 4 (continuación)

Variable PL	Material	Espesor (t) [mm]	Coste sin IVA [UF]	Conductividad Térmica (λ) [W/(m K)]	t/λ [m ² K/W]
X12,1,1	Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m ³	50,00	0,16	0,0410	1,2195
X12,1,2	Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m ³	80,00	0,07	0,0410	1,9512
X12,2,1	Lana de vidrio R122 35 kg/m ³	50,00	0,09	0,0400	1,2500
X13,1,1	Cercha madera	0,00	0,05	0,1500	-
X13,2,1	Cercha metalcon	40,00	0,13	60,0000	0,0007

3.5 RESTRICCIONES

3.5.1 COMPOSICIÓN DE LAS CAPAS

En el modelo matemático se ha impuesto que en cada una de las capas la suma de las variables sea 1, excepto en las de terminación de los muros, cuya función es meramente estética. Estas restricciones imponen que las capas estén compuestas por solo uno de los diferentes materiales disponibles para ellas.

3.5.2 PRESUPUESTO DISPONIBLE

Como se expuso en la Tabla 3, para el tipo de proyectos como el analizado en el presente TFM, se dispone de un límite superior de hasta 1.400 UF para el presupuesto de construcción de la vivienda. De estas 1.400 UF el estado entrega hasta un máximo de 520 UF, a las que se les ha de añadir 30 UF correspondientes al ahorro mínimo exigible que han de aportar los beneficiarios del subsidio.

Dado el marcado carácter social y público beneficiario objetivo de este tipo de proyectos, resulta muy poco frecuente que los núcleos familiares que optan a esta modalidad para la adquisición/edificación de una vivienda aporten un monto superior a las 30 UF correspondientes al ahorro mínimo exigible, es por esto que, de forma general, los proyectos que se presentan a concurso en SERVIU cuenten con sus presupuestos ajustados a 550 UF (520 aportadas por el estado + 30 aportadas por el núcleo familiar).

En el monto de 550 UF se encuentran incluidos tanto los materiales, maquinaria y herramientas y mano de obra como los costes indirectos, IVA y beneficio industrial de la empresa constructora que ejecute el proyecto.

El IVA en Chile cuenta con un único tramo que es del 19% [45], este tipo de proyectos cuentan con un beneficio de un descuento del 65% sobre el IVA establecido por el Servicio de Impuestos Internos de la República [46], al aplicar este descuento, esta tipología de proyectos se ven grabados por un IVA de un 6,65% sobre el total.

El Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU) permite hasta un máximo de un 25% entre costes indirectos (llamados gastos generales, GG, en Chile) y beneficio industrial.

Realizando el siguiente cálculo:

$$\frac{\left(\frac{1400 \text{ UF}}{1,0665}\right)}{1,25} = 1050,16 \text{ UF}$$

Se determina que el presupuesto de construcción podrá ser de hasta 1050,16 UF, según lo establecido por el decreto.

En el presente TFM se están analizando los materiales correspondientes a la envolvente perimetral de la vivienda, es decir, muros perimetrales y cubierta⁸.

Estudiando presupuestos correspondientes a diversos proyectos, se determina que la envolvente de la vivienda se ejecuta con aproximadamente un 45,79% del presupuesto de la vivienda, de esta manera se determina que, del presupuesto máximo establecido por el SERVIU, teóricamente, se podrá disponer de hasta 480,88 UF para la ejecución de las partidas de interés para el presente TFM.

Como ya se ha expuesto, para disponer de hasta 480,88 UF de presupuesto se debería contar con financiación adicional a las 30 UF correspondientes al ahorro mínimo aportado por los beneficiarios del proyecto. En el presente estudio no solo se pretende proponer una solución teóricamente válida, sino que ésta sea lo más realizable posible, para lo que se buscará una solución óptima cuyo presupuesto sea el más cercano al correspondiente a un monto total de 550 UF.

La vivienda tipo empleada para el modelo gastó 48,19 UF (del total de 480,88 UF), del total del presupuesto, en la ejecución de la envolvente, este valor será la referencia para las propuestas obtenidas del modelamiento matemático.

Se establece una restricción de presupuesto máximo de 480,88 UF (para el planteamiento inicial), aunque posteriormente se realizarán escenarios con presupuestos mas restrictivos.

3.5.3 ESPEORES PERMITIDOS

Para la construcción de una vivienda SERVIU exige que se presente una memoria de cálculo estructural avalada por un Ingeniero Civil que acredite que la edificación es capaz de resistir los esfuerzos a los que se verá sometida, principalmente aquellos generados por los sismos y, en menor medida, por la acción del viento.

Debido a este requerimiento, el espesor de los muros y cubiertas está limitado por los requerimientos estructurales más que por un ancho mínimo a cumplir.

No obstante, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones del Ministerio de Vivienda y Urbanismo no permite para la construcción de elementos estructurales de tabiquería (ya sea de perfilería metálica o de madera) espesores menores a 3", con sus correspondientes revestimientos, que suman un espesor mínimo de 100 a 110 mm. Para el caso de viviendas construidas en albañilerías de ladrillo los modelos de ladrillo considerados en el presente trabajo tienen 140 mm de espesor, por lo que,

⁸ Se entiende por cubierta tanto la estructura que la soporta, la aislación termoacústica y su correspondiente revestimiento.

considerando que se ha impuesto un muro formado por hasta 8 capas, se establecerá una restricción de 140 mm como espesor mínimo para los muros.

Respecto de la estructura de cubierta, para las vigas inclinadas que sostienen la cubierta, el perfil mínimo permitido es de 3" de espesor y, para las correas que se sitúan sobre estas, se han de emplear a lo menos perfiles de 2" de sección. En ambos casos se trata de madera seca, cuya sección real es menor a la nominal, siendo una suma entre ambas de en torno a 100 mm. En el caso de emplear perfilera metálica, las secciones se mantienen similares. Considerando que se impone que todas las capas de la cubierta tienen que estar conformadas por un material, establecido por las restricciones del PL, se establecerá que al menos el espesor mínimo del paquete de cubierta sea de 100 mm.

Dado que no existe una limitante establecida para espesores máximos de envolventes, se tomará como criterio un espesor máximo de 5 veces el espesor mínimo. Esto realiza así dado que para el presente escenario al no existir un límite, no se pretende restringir el problema con un tope irreal, pero sí se ha de considerar esta restricción en el modelo matemático para situaciones en las que sí hubiera esta limitante. No obstante, se considerará que las soluciones entregadas sean constructivamente viables y coherentes.

3.5.4 LÍMITES DE TRANSMITANCIA

Para determinar los límites de transmitancia admisibles, se aplicarán los valores establecidos en el Manual de Reglamentación Térmica del MINVU, reflejados en la Tabla 2 a la restricción del modelo representada en la ecuación (14) para los muros y ecuación (15) para la cubierta.

3.5.5 INCOMPATIBILIDADES

De entre los materiales seleccionados para el presente TFM se presenta la siguiente incompatibilidad constructiva: el revestimiento exterior de fibrocemento solo se emplea en caso de construir la estructura principal con tabiques de madera o perfilera metálica, pero no con albañilería de ladrillos, con lo cual se establece la incompatibilidad de estos materiales.

3.6 REDACCIÓN DEL MODELO

Conocidas las variables y ecuaciones que representan el problema, se procede a su modelado en el software, se resuelve el problema empleando Wolfram Mathematica y se contrasta el resultado obtenido con el complemento Solver de Microsoft Excel.

3.6.1 REDACCIÓN EN WOLFRAM MATHEMATICA

Para la redacción del PLE se empleará la notación matricial y la instrucción LinearProgramming, la cual resuelve problemas de optimización, cuyo objetivo es la minimización del peso obtenido de la función objetivo.

Se reescribirán las ecuaciones del problema junto con la notación en el programa con objeto de facilitar legibilidad de modelado en Mathematica.

En primer lugar, se redacta el vector que contiene los términos que multiplican a las variables en la función objetivo (ver Figura 21):

$$\text{Minimizar } S_M \cdot \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} E_{i,j} \cdot k_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} + S_C \cdot \sum_{i=l+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} E_{i,j} \cdot k_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} \quad (9)$$

El vector que contiene dichos términos se denomina "c".

```
c = {
  (* ----- VARIABLES CORRESPONDIENTES AL MURO ----- *)
  552.364, (* x1,1,1 - Pintura 2 manos*)
  6244.755, (* x1,2,1 - Revestimiento Vynil Siding PVC*)
  13341.929, (* x2,1,1 - Fibrocemento 8mm + fieltro*)
  9985.731, (* x2,1,2 - Fibrocemento 6mm + fieltro*)
  50202.965, (* x3,1,1 - Albañilería armada*)
  50202.965, (* x3,2,1 - Albañilería confinada*)
  44037.678, (* x3,3,1 - Tabiquería metalcon*)
  1498.952, (* x3,4,1 - Tabiquería madera 3x2*)
  0, (* x4,1,1 - Cámara aire ventilada 30mm*)
  0, (* x4,1,2 - Cámara aire ventilada 50mm*)
  0, (* x4,1,3 - Cámara aire ventilada 80mm*)
  0, (* x4,1,4 - Cámara aire ventilada 100mm*)
  0, (* x4,1,5 - Cámara aire no ventilada 30mm*)
  0, (* x4,1,6 - Cámara aire no ventilada 50mm*)
  0, (* x4,1,7 - Cámara aire no ventilada 80mm*)
  0, (* x4,1,8 - Cámara aire no ventilada 100mm*)
  10700.866, (* x5,1,1 - Poliestierno 50mm*)
  5765.015, (* x5,2,1 - Lana de vidrio*)
  34242.772, (* x5,1,2 - Poliestierno 80mm*)
  44037.678, (* x6,1,1 - Tabique metalcon*)
  1498.952, (* x6,2,1 - Tabique de madera 3x2*)
  427.645, (* x6,2,2 - Tabique de madera 2x2*)
  4284.703, (* x7,1,1 - Yeso laminado 10mm + enlucido*)
  6863.459, (* x7,1,2 - Yeso laminado 15mm + enlucido*)
  2969.538, (* x7,1,3 - Yeso laminado 8mm + enlucido*)
  2819.451, (* x7,2,1 - Yeso laminado 10mm*)
  4516.342, (* x7,2,2 - Yeso laminado 15mm*)
  1954.036, (* x7,2,3 - Yeso laminado 8mm*)
  552.364, (* x8,1,1 - Pintura 2 manos*)

  (* ----- VARIABLES CORRESPONDIENTES A LA CUBIERTA ----- *)
  16527.722, (* x9,1,1 - Plancha acanalada de zinc 0.35mm*)
  805.561, (* x9,2,1 - Teja de hormigón imitación arcilla*)
  28.033, (* x10,1,1 - Fielto asfáltico*)
  0, (* x11,1,1 - Cámara aire ventilada 30mm*)
  0, (* x11,1,2 - Cámara aire ventilada 50mm*)
  0, (* x11,1,3 - Cámara aire ventilada 80mm*)
  0, (* x11,1,4 - Cámara aire ventilada 100mm*)
  0, (* x11,1,5 - Cámara aire no ventilada 30mm*)
  0, (* x11,1,6 - Cámara aire no ventilada 50mm*)
  0, (* x11,1,7 - Cámara aire no ventilada 80mm*)
  0, (* x11,1,8 - Cámara aire no ventilada 100mm*)
  8354.611, (* x12,1,1 - Poliestireno 50mm*)
  26734.756, (* x12,1,2 - Poliestireno 80mm*)
  4500.987, (* x12,2,1 - Lana de vidrio R122*)
  443.535, (* x13,1,1 - Estructura de techumbre de madera*)
  16353.762 (* x13,2,1 - Estructura de techumbre de metalcon*)
}
```

Figura 21 Redacción del vector con los términos que multiplican a la FO en Mathematica (propia)

En la matriz A solo se representan los términos que se encuentran a la izquierda de las igualdades o desigualdades de las restricciones. Para la introducción de los términos al lado derecho, se emplea la instrucción dada en la Figura 23:

```

b = {
  {1, -1},          (* 0. Terminación exterior muro.*)
  {1, 0},          (* 1. Revestimiento exterior muro.*)
  {1, 0},          (* 2. Estructura principal muro.*)
  {1, 0},          (* 3. Cámara de aire muro.*)
  {1, 0},          (* 4. Aislante térmico muro.*)
  {1, 0},          (* 5. Estructura auxiliar muro.*)
  {1, 0},          (* 6. Revestimiento interior muro.*)
  {1, -1},        (* 6'. Terminación interior muro.*)
  {1, 0},          (* 7. Revestimiento exterior cubierta.*)
  {1, 0},          (* 8. FielTRO asfáltico cubierta.*)
  {1, 0},          (* 8'. Cámara de aire cubierta.*)
  {1, 0},          (* 9. Aislante térmico cubierta.*)
  {1, 0},          (* 10. Estructura de cubierta.*)
  {480.88, -1},   (* 11. Coste por m2.*)
  {560, -1},      (* 12. Espesor máx muros.*)
  {500, -1},      (* 13. Espesor máx cubierta.*)
  {120, 1},       (* 14. Espesor mín muros.*)
  {100, 1},       (* 15. Espesor mín cubierta.*)
  {1/3 - 0.17 - 0.04, 1}, (* 16. Límite de transmitancia térmica en muros.*)
  {1/0.6 - 0.13 - 0.04, 1}, (* 17. Límite de transmitancia térmica en cubierta.*)
  {1, -1},        (* 18. Incompatibilidades.*)
  {1, -1},        (* 19. Incompatibilidades.*)
  {1, -1},        (* 20. Incompatibilidades.*)
  {1, -1},        (* 21. Incompatibilidades.*)
}

```

Figura 23 Límites de las restricciones (propia)

En ella se introduce una matriz de dos columnas y tantas filas como restricciones. En cada una de las filas se introduce el límite de la restricción en el primer término, y en el segundo (tras la ",") el símbolo de desigualdad, que en este caso se representan por:

- i. -1 para indicar " \leq ", menor o igual.
- ii. 0 para indicar "=", igualdad.
- iii. 1, para indicar " \geq ", mayor o igual.

Tras redactar la función objetivo y las restricciones, se ingresa un vector, al que se llamó "lu", en el cual se indican el rango de valores que pueden adoptar cada una de las variables del problema. En el caso de este PLE al tratarse de variables de tipo binario, su rango estará comprendido entre {0,1} (ver Figura 24) y, posteriormente, se indicará la restricción que además son de tipo entero. El vector "lu" junto con la instrucción de integridad de las variables comprenden la ecuación (17).


```

lu = {
    {0, 1}, (*x1,1,1*)
    {0, 1}, (*x1,2,1*)
    {0, 1}, (*x2,1,1*)
    {0, 1}, (*x2,1,2*)
    {0, 1}, (*x3,1,1*)
    {0, 1}, (*x3,2,1*)
    {0, 1}, (*x3,3,1*)
    {0, 1}, (*x3,4,1*)
    {0, 1}, (*x4,1,1*)
    {0, 1}, (*x4,1,2*)
    {0, 1}, (*x4,1,3*)
    {0, 1}, (*x4,1,4*)
    {0, 1}, (*x4,1,5*)
    {0, 1}, (*x4,1,6*)
    {0, 1}, (*x4,1,7*)
    {0, 1}, (*x4,1,8*)
    {0, 1}, (*x5,1,1*)
    {0, 1}, (*x5,2,1*)
    {0, 1}, (*x5,1,2*)
    {0, 1}, (*x6,1,1*)
    {0, 1}, (*x6,2,1*)
    {0, 1}, (*x6,2,2*)
    {0, 1}, (*x7,1,1*)
    {0, 1}, (*x7,1,2*)
    {0, 1}, (*x7,1,3*)
    {0, 1}, (*x7,2,1*)
    {0, 1}, (*x7,2,2*)
    {0, 1}, (*x7,2,3*)
    {0, 1}, (*x8,1,1*)
    {0, 1}, (*x9,1,1*)
    {0, 1}, (*x9,2,1*)
    {0, 1}, (*x10,1,1*)
    {0, 1}, (*x11,1,1*)
    {0, 1}, (*x11,1,2*)
    {0, 1}, (*x11,1,3*)
    {0, 1}, (*x11,1,4*)
    {0, 1}, (*x11,1,5*)
    {0, 1}, (*x11,1,6*)
    {0, 1}, (*x11,1,7*)
    {0, 1}, (*x11,1,8*)
    {0, 1}, (*x12,1,1*)
    {0, 1}, (*x12,1,2*)
    {0, 1}, (*x12,2,1*)
    {0, 1}, (*x13,1,1*)
    {0, 1}, (*x13,2,1*)
}
    
```

Figura 24 Redacción del vector "lu" (propia)

Una vez se han introducido los datos del PL a Mathematica se introduce la instrucción "LinearProgramming" que se encarga de buscar el óptimo de la función a través del método del Simplex. Los argumentos que requiere esta instrucción son:

- i. Vector con los términos de la FO, "c".
- ii. Matriz con los términos de las restricciones, "A".
- iii. Matriz con los límites e igualdades (o desigualdades), "b".
- iv. Matriz con los rangos de las variables.
- v. [Opcional] Se indica que la integridad de las variables, mediante la instrucción "Integers".

Tras aplicar la instrucción, Mathematica entrega el resultado de las variables (ver Figura 25):

```
LinearProgramming[c, A, b, lu, Integers]
[programación lineal] [números enteros]
{0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0}
```

Figura 25 Resolución mediante LinearProgramming (propia)

Para obtener el peso de la función objetivo se aplica el producto escalar del resultado obtenido por LinearProgramming multiplicado por el vector de la función objetivo (ver Figura 26):

```
(*Cálculo de la huella energética obtenida:*)
c.{0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0}
25409.5
```

Figura 26 Cálculo del peso de la función objetivo (propia)

Mediante la función "Timing" se comprueba el tiempo que demora el programa en obtener la solución al problema:

```
Timing[LinearProgramming[c, A, b, lu, Integers]]
[crónometro] [programación lineal] [números enteros]
{0.015625, {0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0}}
```

Figura 27 Cronómetro del tiempo de ejecución (propia)

Como se puede ver en la Figura 27 Mathematica solo necesita 0,015625 segundos para obtener la solución del problema.

Antes de proceder al análisis de los resultados obtenidos, se realiza la verificación de éstos a través del complemento Solver de Excel.

3.6.2 REDACCIÓN EN SOLVER

Para la resolución del PL en Microsoft Excel mediante el complemento Solver, la notación empleada es similar a la utilizada en Mathematica, empleando la interfaz de celdas del programa, se crean los vectores y matrices que se necesitan para la resolución. En el presente TFM se han estructurado las hojas de cálculo con la información ordenada según se muestra en la Figura 28:

		Términos de la FO					
		Resultado de las variables					Peso de la FO
		Términos de las restricciones					
						Resultado de las restricciones	Límites de las restricciones

Figura 28 Estructura de la información en Excel (propia)

Tras la redacción de la información en Excel, se abre el menú de Solver en el cual se indican los parámetros señalados en la Figura 29:

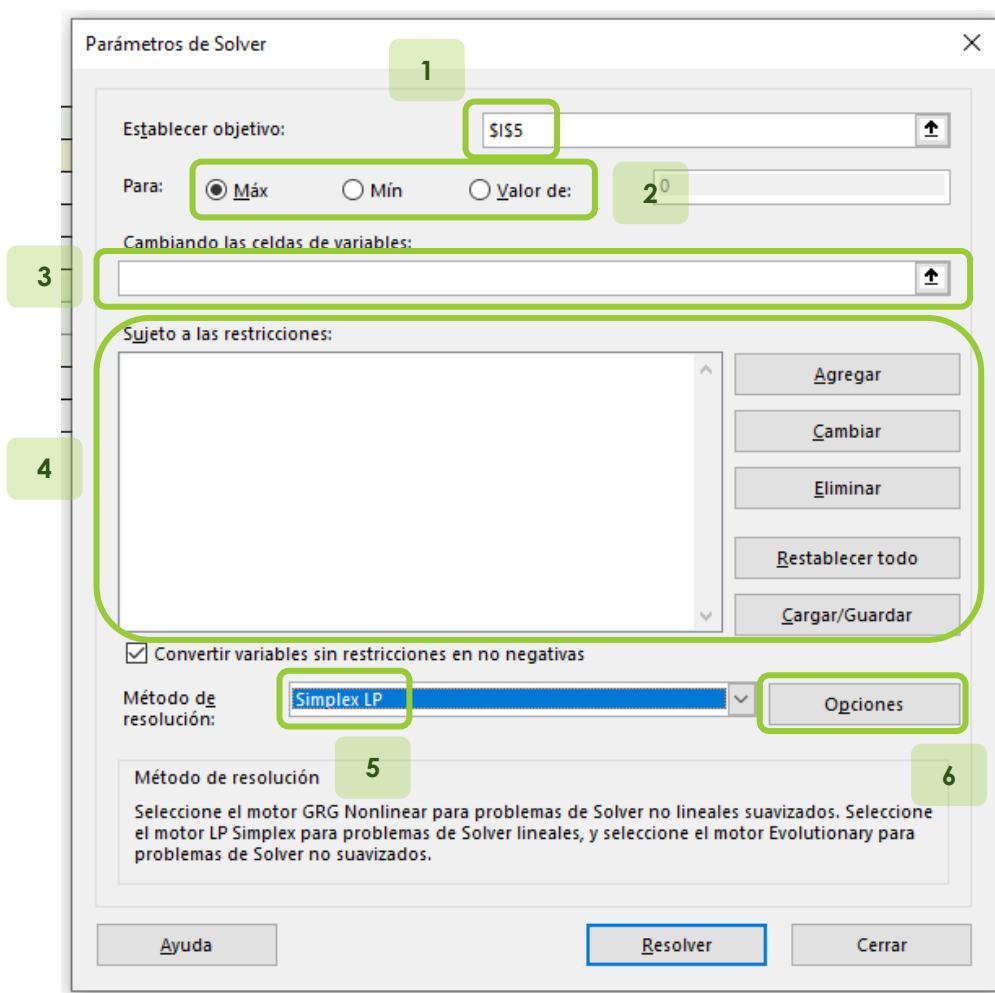


Figura 29 Captura de pantalla de Solver (propia)

En el menú de Solver se establecen las siguientes indicaciones:

1. Referencia a la celda donde se encuentra formulada la función objetivo.
2. Selección del objetivo a optimizar.
3. Selección del rango de celdas donde estará el resultado de las variables.
4. Panel para establecer las restricciones.

- Menú de selección de método a emplear para su resolución.
- Tras rellenar la información de la ventana, se entra a la configuración de Opciones (ver Figura 30).

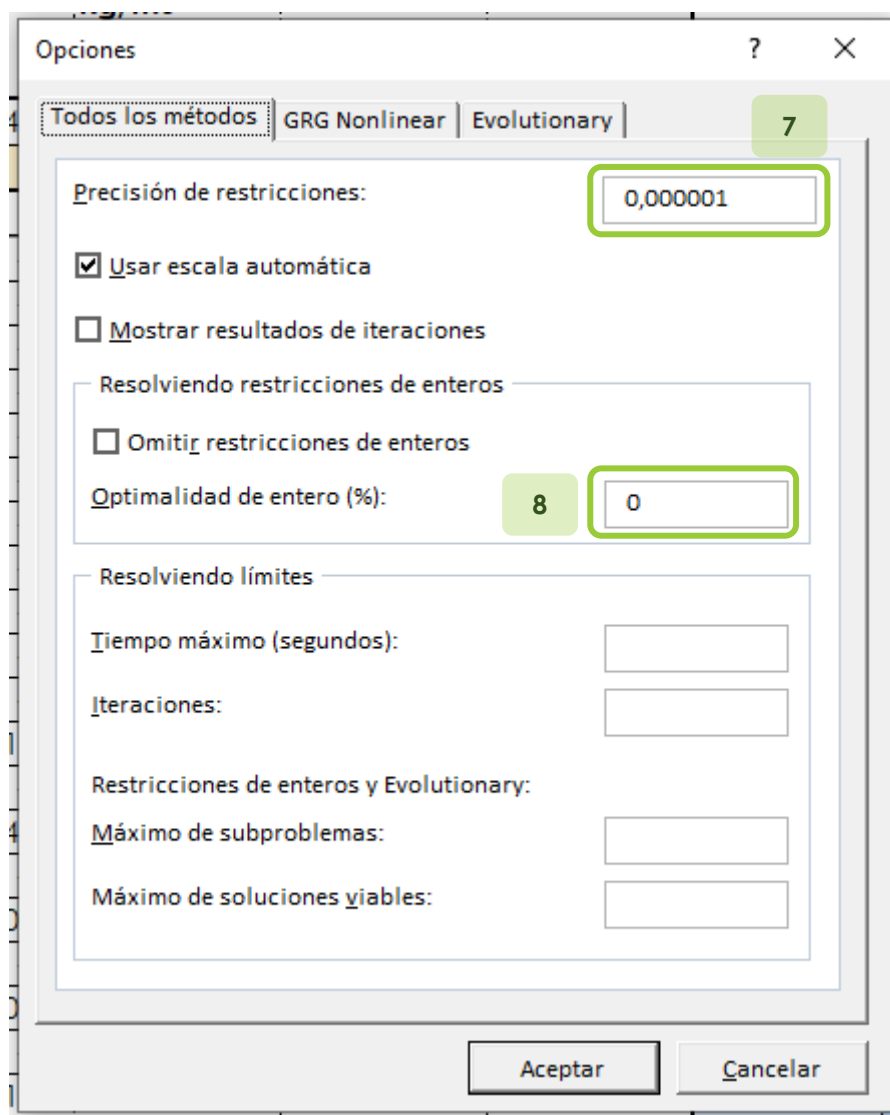


Figura 30 Captura de pantalla de la ventana opciones de Solver (propia)

En la ventana de opciones de Solver se definen los siguientes parámetros:

- Se define la precisión con la que se buscarán los resultados, se mantiene valor por defecto.
- Se establece la optimalidad de entero, es decir, el nivel de precisión que se le exige al programa para la solución devuelta. Al dar valor 0 se está exigiendo que entregue la solución óptima.

Además de la precisión de las variables y el grado de precisión de óptimo, se le pueden establecer límites de tiempo o iteraciones máximas permitidas para la búsqueda de la solución, en este caso al no ser de interés, no se establece un tope máximo.

Tras pasar toda la información del modelo a la estructura de Excel y aplicar el complemento Solver, este devuelve un informe con los resultados obtenidos.

El informe de resultados del problema entregado por el programa se presenta en la Figura 31.

Microsoft Excel 16.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [TFM_07_Resolucion_Solver_V2.xlsx]01 General
 Informe creado: 01/01/2021 10:24:47
 Resultado: Solver encontró una solución de enteros dentro de la tolerancia. Se cumplen todas las restricciones.
Motor de Solver
 Motor: Simplex LP
 Tiempo de la solución: 1,171 segundos.
 Iteraciones: 1 Subproblemas: 2
Opciones de Solver
 Tiempo máximo ilimitado, Iteraciones ilimitado, Precisión 0,000001, Usar escala automática
 Máximo de subproblemas ilimitado, Máximo de soluciones de enteros ilimitado, Tolerancia de enteros 0%, Asumir no negativo

Celda objetivo (Mín)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$AX\$4	Minimizar	25,409,49	25,409,49

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$E\$5	x1,1,1 - Pintura 2 manos	0	0	Binario
\$F\$5	x1,2,1 - Revestimiento Vynil Siding exterior PVC	0	0	Binario
\$G\$5	x2,1,1 - Placa de fibrocemento 120x240cm x 8mm + fieltro	0	0	Binario
\$H\$5	x2,1,2 - Placa de fibrocemento 120x240cm x 6mm + fieltro	1	1	Binario
\$I\$5	x3,1,1 - Albañilería armada	0	0	Binario
\$J\$5	x3,2,1 - Albañilería confinada	0	0	Binario
\$K\$5	x3,3,1 - Tabique metalcon	0	0	Binario
\$L\$5	x3,4,1 - Tabiquería de madera	1	1	Binario
\$M\$5	x4,1,1 - Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	0	0	Binario
\$N\$5	x4,1,2 - Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	0	0	Binario
\$O\$5	x4,1,3 - Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	0	0	Binario
\$P\$5	x4,1,4 - Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	0	0	Binario
\$Q\$5	x4,1,5 - Cámara de aire no ventilada 30mm	1	1	Binario
\$R\$5	x4,1,6 - Cámara de aire no ventilada 50mm	0	0	Binario
\$S\$5	x4,1,7 - Cámara de aire no ventilada 80mm	0	0	Binario
\$T\$5	x4,1,8 - Cámara de aire no ventilada 100mm	0	0	Binario
\$U\$5	x5,1,1 - Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m3	0	0	Binario
\$V\$5	x5,2,1 - Lana de vidrio R122 35 kg/m3	1	1	Binario
\$W\$5	x5,1,2 - Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m3	0	0	Binario
\$X\$5	x6,1,1 - Tabique metalcon	0	0	Binario
\$Y\$5	x6,2,1 - Tabiquería de madera	0	0	Binario
\$Z\$5	x6,2,2 - Tabiquería madera 2x2	1	1	Binario
\$AA\$5	x7,1,1 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm + enlucido	0	0	Binario
\$AB\$5	x7,1,2 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm + enlucido	0	0	Binario
\$AC\$5	x7,1,3 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm + enlucido	0	0	Binario
\$AD\$5	x7,2,1 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm	0	0	Binario
\$AE\$5	x7,2,2 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm	0	0	Binario
\$AF\$5	x7,2,3 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm	1	1	Binario
\$AG\$5	x8,1,1 - Pintura 2 manos	0	0	Binario
\$AH\$5	x9,1,1 - Plancha acanalada onda zinc 0,35x851x3000	0	0	Binario
\$AI\$5	x9,2,1 - Teja	1	1	Binario
\$AJ\$5	x10,1,1 - Fieltró asfáltico	1	1	Binario
\$AK\$5	x11,1,1 - Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	0	0	Binario
\$AL\$5	x11,1,2 - Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	0	0	Binario
\$AM\$5	x11,1,3 - Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	0	1	Binario
\$AN\$5	x11,1,4 - Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	0	0	Binario
\$AO\$5	x11,1,5 - Cámara de aire no ventilada 30mm	0	0	Binario
\$AP\$5	x11,1,6 - Cámara de aire no ventilada 50mm	1	0	Binario
\$AQ\$5	x11,1,7 - Cámara de aire no ventilada 80mm	0	0	Binario
\$AR\$5	x11,1,8 - Cámara de aire no ventilada 100mm	0	0	Binario
\$AS\$5	x12,1,1 - Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m3	0	0	Binario
\$AT\$5	x12,1,2 - Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m3	0	0	Binario
\$AU\$5	x12,2,1 - Lana de vidrio R122 35 kg/m3	1	1	Binario
\$AV\$5	x13,1,1 - Cercha madera	1	1	Binario
\$AW\$5	x13,2,1 - Cercha metalcon	0	0	Binario

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$AX\$14	Terminación interior muro	-	\$AX\$14<=\$AZ\$14	No vinculante	1
\$AX\$15	Revestimiento exterior cubierta	1,00	\$AX\$15=\$AZ\$15	Vinculante	0
\$AX\$16	Fieltró asfáltico cubierta	1,00	\$AX\$16=\$AZ\$16	Vinculante	0
\$AX\$17	Cámara de aire cubierta	1,00	\$AX\$17=\$AZ\$17	Vinculante	0
\$AX\$18	Aislante térmico cubierta	1,00	\$AX\$18=\$AZ\$18	Vinculante	0
\$AX\$19	Estructura de cubierta	1,00	\$AX\$19=\$AZ\$19	Vinculante	0
\$AX\$20	Coste total	71,78	\$AX\$20<=\$AZ\$20	No vinculante	409,1000296
\$AX\$21	Espesor máx muros	221,00	\$AX\$21<=\$AZ\$21	No vinculante	379
\$AX\$22	Espesor máx cubierta	154,81	\$AX\$22<=\$AZ\$22	No vinculante	345,19
\$AX\$23	Espesor mín muro	221,00	\$AX\$23>=\$AZ\$23	No vinculante	101,00
\$AX\$24	Espesor mín cubierta	154,81	\$AX\$24>=\$AZ\$24	No vinculante	54,81
\$AX\$25	Límite transmitancia térmica en muros	2,32	\$AX\$25>=\$AZ\$25	No vinculante	2,20
\$AX\$26	Límite transmitancia térmica en cubierta	2,16	\$AX\$26>=\$AZ\$26	No vinculante	0,66
\$AX\$27	Incompatibilidades : placa fibrocemento 8 mm + albañilería armada	-	\$AX\$27<=\$AZ\$27	No vinculante	1
\$AX\$28	Incompatibilidades : placa fibrocemento 8 mm + albañilería confinada	-	\$AX\$28<=\$AZ\$28	No vinculante	1
\$AX\$29	Incompatibilidades : placa fibrocemento 6 mm + albañilería armada	1,00	\$AX\$29<=\$AZ\$29	Vinculante	0
\$AX\$30	Incompatibilidades : placa fibrocemento 6 mm + albañilería confinada	1,00	\$AX\$30<=\$AZ\$30	Vinculante	0
\$AX\$7	Terminación exterior muro	-	\$AX\$7<=\$AZ\$7	No vinculante	1
\$AX\$8	Revestimiento exterior muro	1,00	\$AX\$8=\$AZ\$8	Vinculante	0
\$AX\$9	Estructura principal muro	1,00	\$AX\$9=\$AZ\$9	Vinculante	0
\$AX\$10	Cámara de aire muro	1,00	\$AX\$10=\$AZ\$10	Vinculante	0
\$AX\$11	Aislante térmico muro	1,00	\$AX\$11=\$AZ\$11	Vinculante	0
\$AX\$12	Estructura auxiliar muro	1,00	\$AX\$12=\$AZ\$12	Vinculante	0
\$AX\$13	Revestimiento interior muro	1,00	\$AX\$13=\$AZ\$13	Vinculante	0
\$E\$5:\$AW\$5	=Binario				

Figura 31 Informe de resultados generado en Solver (propia)

Tras comparar los resultados obtenidos con ambos softwares, se aprecia que en ambos casos se han llegado a una huella óptima de 25.409,49 MJ, al obtener un resultado coherente en ambos programas, se pasa al análisis de los resultados.

En el caso de Solver, se ha demorado 1,171 segundos en obtener el resultado.

3.7 EQUIPO EMPLEADO

Para la resolución del problema planteado se ha contado con las siguientes herramientas:

- i. Programas informáticos:
 - a. Wolfram Mathematica 12.0 Student Edition
 - b. Excel incluido en la Suite de Microsoft 365 (versión 2002, compilación 12527.21416).
- ii. Ordenador HP Pavilion 24-b215la con:
 - a. Procesador Intel Core i3-7100T 3,40 GHz, 4 núcleos.
 - b. Memoria RAM 8,00 GB.
 - c. Disco SSD.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se mostró en los apartados 3.6.1 y 3.6.2 se ha obtenido la misma huella energética para la vivienda analizada, pero la solución obtenida en cada caso no ha sido exactamente la misma, sino que han presentado leves diferencias como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5 Comparativa resultados modelo general (propia)

Variables	Solución Mathematica	Solución Solver
x1,1,1 - Pintura 2 manos	0	0
x1,2,1 - Revestimiento Vynil Siding exterior PVC	0	0
x2,1,1 - Placa de fibrocemento 120x240cm x 8mm + fieltro	0	0
x2,1,2 - Placa de fibrocemento 120x240cm x 6mm + fieltro	1	1
x3,1,1 - Albañilería armada	0	0
x3,2,1 - Albañilería confinada	0	0
x3,3,1 - Tabique metalcon	0	0
x3,4,1 - Tabiquería de madera 3x2	1	1
x4,1,1 - Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	1	0
x4,1,2 - Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	0	0
x4,1,3 - Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	0	0
x4,1,4 - Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	0	0
x4,1,5 - Cámara de aire no ventilada 30mm	0	1
x4,1,6 - Cámara de aire no ventilada 50mm	0	0
x4,1,7 - Cámara de aire no ventilada 80mm	0	0
x4,1,8 - Cámara de aire no ventilada 100mm	0	0
x5,1,1 - Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m3	0	0
x5,2,1 - Lana de vidrio R122 35 kg/m3	1	1
x5,1,2 - Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m3	0	0
x6,1,1 - Tabique metalcon	0	0
x6,2,1 - Tabiquería de madera 3x2	0	0
x6,2,2 - Tabiquería madera 2x2	1	1
x7,1,1 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm + enlucido	0	0
x7,1,2 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm + enlucido	0	0
x7,1,3 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm + enlucido	0	0
x7,2,1 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm	0	0
x7,2,2 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm	0	0

Tabla 5 (Continuación)

Variables	Solución Mathematica	Solución Solver
x7,2,3 - Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm	1	1
x8,1,1 - Pintura 2 manos	0	0
x9,1,1 - Plancha acanalada onda zinc 0,35x851x3000	0	0
x9,2,1 - Teja	1	1
x10,1,1 - Fieltro asfáltico	1	1
x11,1,1 - Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	0	0
x11,1,2 - Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	0	0
x11,1,3 - Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	0	1
x11,1,4 - Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	1	0
x11,1,5 - Cámara de aire no ventilada 30mm	0	0
x11,1,6 - Cámara de aire no ventilada 50mm	0	0
x11,1,7 - Cámara de aire no ventilada 80mm	0	0
x11,1,8 - Cámara de aire no ventilada 100mm	0	0
x12,1,1 - Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m ³	0	0
x12,1,2 - Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m ³	0	0
x12,2,1 - Lana de vidrio R122 35 kg/m³	1	1
x13,1,1 - Cercha madera	1	1
x13,2,1 - Cercha metalcon	0	0

Se destacan en negrita los materiales seleccionados tanto por Wolfram Mathematica como Solver, y con fondo celeste aquellos para los que Solver ha proporcionado una opción diferente.

Ambas soluciones presentan una misma huella energética de 24.409,49 MJ, por lo que se puede concluir que en ambos casos se ha obtenido el óptimo de la función objetivo, cuyo objetivo era la minimización de la huella energética de la vivienda, considerando los elementos que componen la superficie opaca de la envolvente.

Tras comparar ambas soluciones se aprecia que la diferencia radica en las cámaras de aire seleccionadas, que se corresponden con elementos que a priori no incrementan ni la huella energética ni el coste de la vivienda, de acuerdo con datos introducidos al modelo, pues se entiende que el aire es un elemento gratuito y que no genera gasto energético el que la capa de aire sea de mayor o menor dimensión.

Las diferencias entre ambas soluciones se ven en los valores de las restricciones relativas a la transmitancia térmica de muros y cubierta, que se plasman en la Tabla 6.

Tabla 6 Diferencias entre soluciones (propia)

Restricción	Límite	Solución Mathematica	Solución Excel Solver	Diferencia ⁹
Resistencia térmica en muros	≥ 0,12	2,52	2,32	7,94%
Resistencia térmica en cubierta	≥ 1,50	2,38	2,16	9,23%

Como se muestra en la tabla las diferencias no son significativas, esto se origina en el distinto camino por el que ambos programas llegan a la solución.

Tras comparar ambas soluciones, se puede afirmar que el resultado entregado por Wolfram Mathematica es el mejor, dado que habiendo alcanzado el óptimo de la función, entrega una mejor aislación térmica, que se traducirá en un mayor confort para el usuario final.

Si se realiza un comparativo entre la solución óptima y la vivienda tipo analizada en el presente TFM se encuentran las diferencias reflejadas en la Tabla 7:

Tabla 7 Comparación entre vivienda tipo solución propuesta (propia)

	Vivienda tipo	Propuesta	Diferencia ¹⁰
Huella energética [MJ]	71.703,24	25.409,19	-65%
Coste [UF]	48,19	71,78	+49%
Resistencia térmica muros [W/(m ² K)]	0,39	2,52	+546%
Resistencia térmica cubierta [W/(m ² K)]	1,25	2,38	+90%

Como se aprecia en la Tabla 7, habiendo un incremento de presupuesto, se mejoran significativamente todos los parámetros de la vivienda, en especial la aislación térmica de los muros de la envolvente de la vivienda.

4.1.1 SOLUCIÓN ÓPTIMA TEÓRICA

Se puede concluir que, tras el análisis matemático, la solución óptima para la envolvente de la vivienda, emplazada en la zona térmica N°2 es aquella que está formada por los siguientes materiales:

- i. **Muros perimetrales:**
 - a. **Revestimiento exterior:** placa de fibrocemento de 6 mm de espesor con fieltro.
 - b. **Estructura principal:** tabique de madera de listones de 3"x2".
 - c. **Aislación I:** cámara de aire ligeramente ventilada de 30 milímetros de espesor.

⁹ Diferencia calculada cómo:

$$\frac{\text{Solución Mathematica} - \text{Solución Solver}}{\text{Solución Mathematica}} \cdot 100 [\%]$$

¹⁰ Diferencia calculada cómo:

$$\frac{\text{Solución propuesta} - \text{Vivienda tipo}}{\text{Vivienda tipo}} \cdot 100 [\%]$$

- d. **Aislación II:** lana de vidrio R122.
 - e. **Estructura secundaria:** tabique de madera en listones de 2"x2".
 - f. **Revestimiento interior:** placas de yeso cartón (yeso laminado) de 8 milímetros de espesor.
- ii. **Cubierta:**
- a. **Cubierta:** teja de hormigón.
 - b. **Barrera de humedad:** fieltro asfáltico.
 - c. **Aislación I:** cámara de aire ligeramente ventilada de 80 milímetros de espesor.
 - d. **Aislación II:** Lana de vidrio R122.
 - e. **Estructura:** cerchas de madera.

4.2 CONSIDERACIONES Y ESCENARIOS

No se ha de perder de vista que los resultados hasta ahora presentados corresponden a la modelización general del problema, es decir, respondiendo a las siguientes condiciones:

- i. Imposición de condiciones de aislación exigidas para la zona térmica número 2 del Manual de Reglamentación Térmica del MINVU.
- ii. Disposición de la parte correspondiente del presupuesto máximo admisible por el decreto que, como se expuso en el apartado 3.5.2 no es algo de lo que se pueda disponer en la mayoría de los casos.

Ante estas consideraciones se proponen los siguientes escenarios a analizar, partiendo de la modelización del caso general:

- i. Se modificarán las restricciones para plantear el modelo de acuerdo a las exigencias de las zonas térmicas 1, 3, 4, 5, 6 y 7.
- ii. Restricción para el presupuesto mínimo necesario, que satisfaga las restricciones del PL. Éste no se corresponde con las 48,19 UF empleadas en la vivienda tipo dado que con dicha cantidad no se pueden cumplir las restricciones que imponen todas las capas por las que se forma el muro, el presupuesto mínimo viable se sitúa en el entorno de las 55,00 UF a 56,00 UF.
- iii. Presupuesto ajustado a 60 UF.
- iv. Presupuesto ajustado a 65 UF.

Dado que para los escenarios planteados los pasos son los mismos, salvo con las modificaciones puntuales que cada situación requiere, no se considera de interés repetir las imágenes de cada uno de los pasos en ambas herramientas.

De la misma manera que para el caso general, se produjeron diferencias en las cámaras de aire entre ambos resultados, pero siempre obteniendo la misma huella energética. Aplicando el mismo criterio que en la situación anterior, se mantienen los resultados entregados por Wolfram Mathematica. Se presentan en la Tabla 8 los resultados obtenidos para los diferentes escenarios.

Tabla 8 Comparación entre los distintos escenarios (propia)

	Huella energética [MJ]	Coste [UF]	Resistencia térmica muros [(m ² K)/W]	Resistencia térmica cubierta [(m ² K)/W]
Vivienda tipo	71.703,24	48,19	0,39	1,25
Óptimo (ZT 2)	25.409,19	71,78	2,52	2,38
Zona térmica 3	25.409,19	71,78	2,52	2,16
Zona térmica 4	47.643,26	70,58	2,52	3,08
Zona térmica 5				
Zona térmica 6				
Zona térmica 7	Sin solución			
Zona térmica 1	25.409,49	71,78	2,52	1,64
Ppto. mínimo	91.843,18	55,59	3,96	2,33
Ppto. 60UF	41.131,66	58,33	2,52	2,36
Ppto. 65UF				

4.2.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras resolver el problema en los diferentes escenarios, resultan notables los casos de los escenarios correspondientes a las zonas térmicas 6 y 7, para los cuales no se puede encontrar una solución óptima que satisfaga las restricciones. En ambos casos falla la restricción correspondiente al límite de transmitancia térmica en cubiertas, cumpliendo el 90% de la exigencia en la zona térmica 6 y el 80% en la zona térmica 7. La solución más cercana al cumplimiento de las restricciones del PLE entrega los siguientes resultados:

- i. Huella energética: 138.727,87 MJ
- ii. Coste: 82,61 UF
- iii. Resistencia térmica muros: 1,64 [m² K/W]

Al contrastar las zonas térmicas 6 y 7 con los mapas del Manual de Reglamentación Térmica del MINVU (ver Anexo 1: zonas térmicas) se comprueba que se corresponden con zonas de alta montaña y territorio más austral del país, incluso, el Territorio Antártico Chileno (ver Figura 32, en la que se muestra VI Región, correspondiente a la zona central del país, dónde la zona térmica 7 aparece en la parte más oriental del mapa, correspondiente a la Cordillera de los Andes), que se encuentran claramente fuera del ámbito objetivo del presente TFM. No obstante, se ha

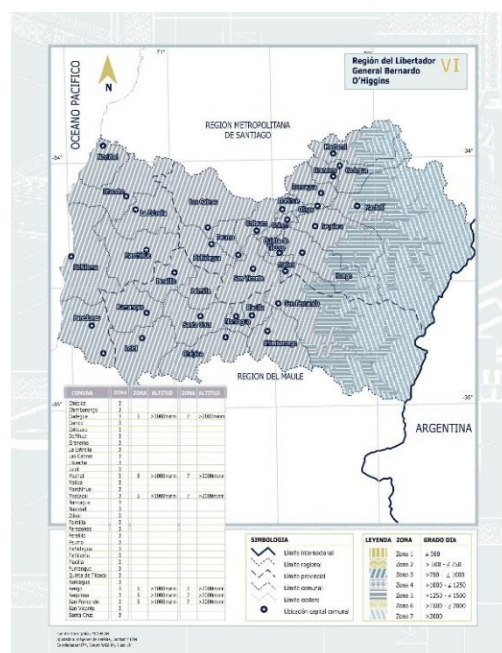


Figura 32 Mapa de zonas térmicas de la VI Región [33]

de tener en cuenta que para los proyectos desarrollados en las Regiones que cuentan con climatología extrema, el aporte del estado se eleva de 520 UF a 700 UF, además de las 30 UF de aporte mínimo necesario por parte de beneficiarios y, se incrementa el tope máximo del presupuesto de 1.400 UF a 1.600 UF, por lo que aquellos proyectos a ejecutarse en dichas zonas climáticas contaría con un extra de financiación que les permitiría acceder a una mayor variedad de materiales, propios de la construcción en dichas condiciones.

Resulta evidente que a medida que se aumenta el presupuesto se consiguen mejores resultados ambientales, reduciendo la huella energética de vivienda, como se muestra en la línea de tendencia de la Figura 33. Si bien, la tendencia es que al aumentar el presupuesto se reduce la energía incorporada, se ven dos picos evidentes, correspondientes con las soluciones de presupuesto mínimo y zonas térmicas 4 y 5, esto se debe a que estas soluciones recurren, por necesidad de cumplimiento de las restricciones, al empleo de poliestireno expandido en lugar de lana de vidrio para la aislación, la cual incrementa notablemente la huella.

Por otra parte, cabría esperar que la vivienda tipo fuese la que mayor energía incorporada tuviera. El por qué esto no es así es debido a que la vivienda estudiada solo cuenta un muro monocapa, es decir no lleva aislación, y como se mostró en la Tabla 8, es el escenario que peor desempeño muestra en la aislación térmica de la vivienda.

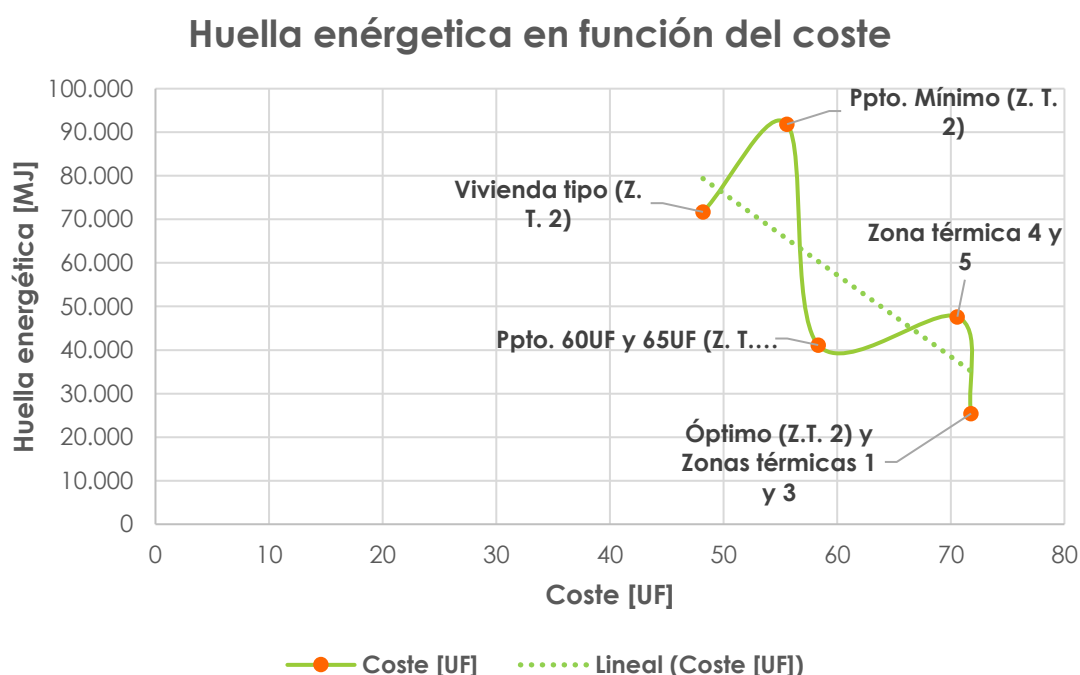


Figura 33 Variación de la huella energética en función del presupuesto (propia)

Resulta llamativo que al pasar del caso con presupuesto mínimo a aquellos que permiten hasta 60 UF y 65 UF, que presentan idénticas soluciones, se logre reducir la huella energética a costa de perder aislación térmica, lo mismo sucede respecto al caso general. Esto se debe a los materiales empleados, tanto en la solución óptima como en los presupuestos de hasta 60 y 65 unidades de fomento se emplea la lana de vidrio como material aislante. Si bien la lana cumple con los requerimientos del MINVU,

tiene un peor desempeño como aislante térmico que el poliestireno expandido, el cual resulta mucho más barato, por lo que es empleado en la solución que busca reducir al máximo los recursos económicos destinados a la ejecución de la vivienda.

La solución propuesta para los dos últimos escenarios se posicionaría como la más recomendable, pues si bien no es la que más reduce la huella energética de la vivienda, es la que presenta un mejor equilibrio entre el impacto ambiental, recursos económicos destinados y confort térmico para sus usuarios finales. En la Figura 34 se presenta en un gráfico radial el desempeño comparado entre las distintas soluciones y en la Figura 35 el mismo gráfico sin vivienda tipo.

En los gráficos radiales se han considerado las variables de huella energética, transmitancia térmica en cubierta, transmitancia térmica en muros y coste, cuanto menor sea el área encerrada dentro del polígono formado por cada solución mejor será esta.

Soluciones a los escenarios

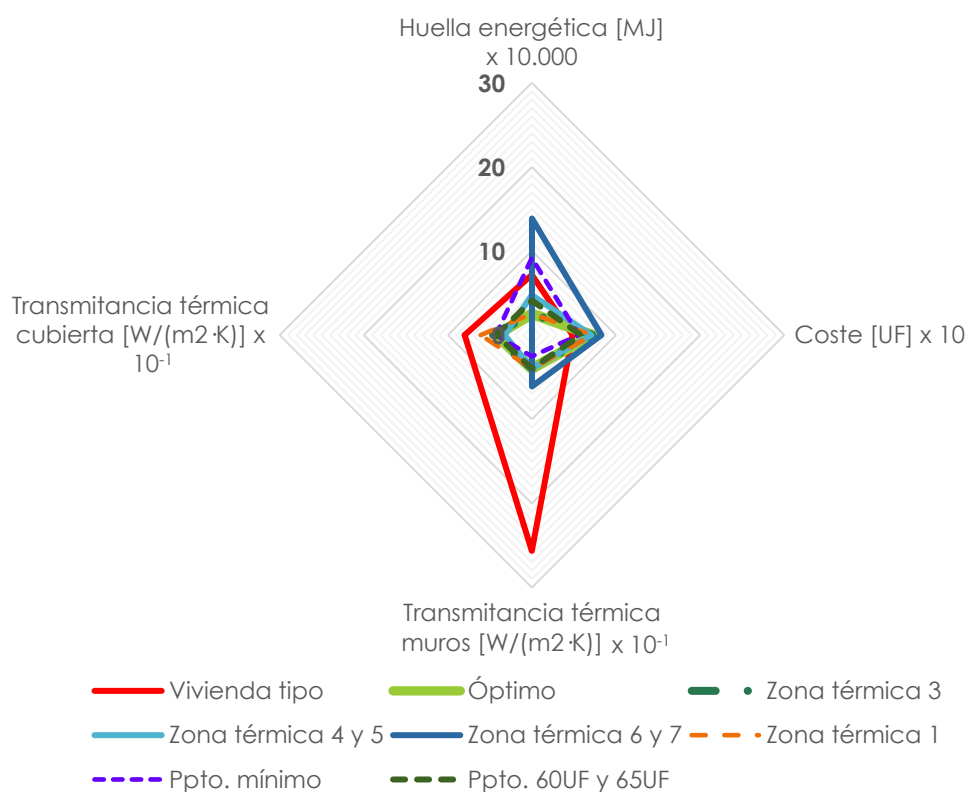


Figura 34 Comparativa gráfica entre las soluciones (propia)

Soluciones a los escenarios

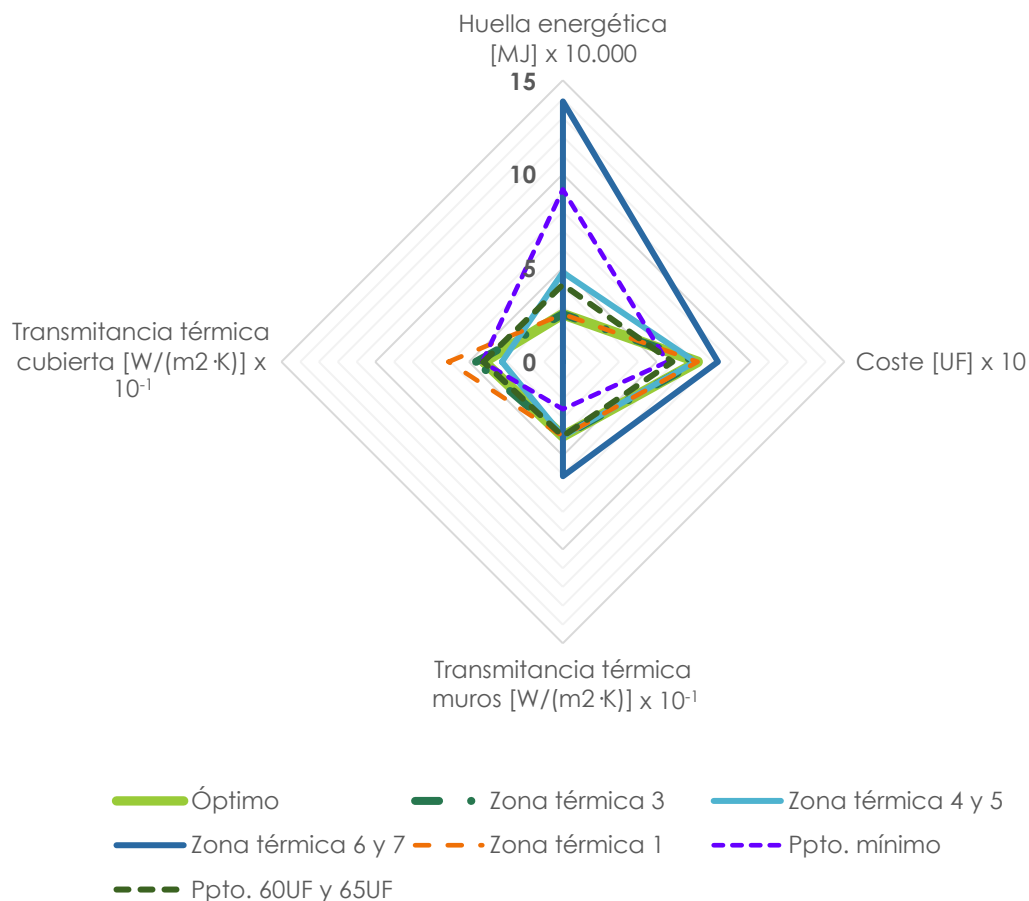


Figura 35 Comparativa gráfica entre las soluciones, sin vivienda tipo (propia)

Agregando la solución correspondiente al presupuesto acotado a 60 UF a la tabla comparativa con la vivienda tipo (ver Tabla 9), se puede apreciar que si bien no logra igualar la reducción del impacto ambiental del caso general, con incremento presupuestario del 50% respecto de lo requerido en el caso general se consigue la misma mejora en la aislación térmica en muros, casi la misma en cubierta y una reducción de la huella energética de un 43% respecto a la vivienda estudiada, lo cual, aplicado en masa supondría un ahorro significativo en la huella energética del parque habitacional.

Tabla 9 Comparación entre vivienda tipo, escenario general y escenario con presupuesto limitado (propia)

	Vivienda tipo	Solución óptima	Presupuesto 60UF	Diferencia óptimo respecto vivienda tipo	Diferencia 60 UF respecto vivienda tipo
Huella energética [MJ]	71.703,24	25.409,19	41.131,66	-65%	-43%
Coste [UF]	48,19	71,78	58,33	+49%	+24%
Resistencia térmica muros [(m² K)/W]	0,39	2,52	2,52	+546%	+546%
Resistencia térmica cubierta [(m² K)/W]	1,25	2,38	2,36	+90%	+89%

Se destaca que la solución seleccionada, al igual que la correspondiente a la solución óptima, es válida tanto para las zonas térmicas 1 y 2, pero también lo es para la zona térmica 3, lo cual ampliaría su rango de aplicación en el país. Los materiales aplicados en la misma son:

- i. **Muros perimetrales:**
 - a. **Revestimiento exterior:** placa de fibrocemento de 6 mm de espesor con fieltro.
 - b. **Estructura principal:** tabique de madera de listones de 3"x2".
 - c. **Aislación I:** cámara de aire ligeramente ventilada de 30 milímetros de espesor.
 - d. **Aislación II:** lana de vidrio R122.
 - e. **Estructura secundaria:** tabique de madera en listones de 2"x2".
 - f. **Revestimiento interior:** placas de yeso cartón (yeso laminado) de 8 milímetros de espesor.
- ii. **Cubierta:**
 - a. **Cubierta:** plancha acanalada de zinc de 0,35 milímetros.
 - b. **Barrera de humedad:** fieltro asfáltico.
 - c. **Aislación I:** cámara de aires ligeramente ventilada de 100 milímetros de espesor.
 - d. **Aislación II:** Lana de vidrio R122.
 - e. **Estructura:** cerchas de madera.

El uso de estructuras de madera ha sido algo común en todos los escenarios planteados, lo cual se debe a que, si bien el proceso productivo desde que se tala un árbol hasta que coloca el listón de madera en la vivienda conlleva un coste energético, mientras el árbol está vivo, a través del proceso de fotosíntesis, éste contribuye a la reducción del nivel de CO₂ en la atmósfera, de manera que compensa el impacto ambiental de su proceso productivo de tal manera que las alternativas a esta estructura no pueden.

La gran diferencia entre el impacto al medio ambiente entre la solución óptima y la propuesta seleccionada está en el material seleccionado para su cubierta, dado que el proceso productivo de cubiertas metálicas resulta mucho más nocivo para el entorno de lo que afecta la producción en masa de tejas de hormigón.

Respecto a los programas utilizados, ambos tardaron muy poco tiempo en resolver el problema, 0,015625 segundos Mathematica y 1,171 segundos Excel. Sí se quiere destacar que Mathematica ha empleado en torno al 1% del tiempo que ha requerido Excel junto con el complemento Solver, lo cual muestra que a medida que crezca tanto en tamaño como en complejidad el modelo planteado el uso de un programa específico como Mathematica queda justificado.

5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES

El objetivo general del presente estudio buscaba, a través de uso de la programación lineal entera, una combinación de materiales que permitiera buscar una combinación de materiales que redujera al mínimo la huella energética de las viviendas, que a su vez cumpliera con las siguientes condiciones:

- i. Cumplimiento de los requisitos de aislación térmica establecidos por las autoridades competentes.
- ii. Empleo de materiales disponibles en el mercado chileno y autorizados por las autoridades.
- iii. Empleo eficiente de los recursos económicos disponibles.

A la vista del análisis de los resultados y solución propuesta, queda establecido que el empleo de la programación lineal entera ha permitido encontrar una solución que cumpla con los requisitos establecidos.

La solución propuesta permite una reducción de la huella energética de la vivienda de un 43% sobre la vivienda tipo analizada que, considerando el déficit habitacional del país de 425.000 viviendas junto a las 314.000 que necesitan reemplazo, el potencial impacto podría llegar a ser de en torno a 22.610×10^6 MJ (veinte y dos mil seiscientos diez millones de mega julios).

Un elemento común a todas las soluciones ha sido la madera, pues antes de su explotación mientras está forma de árbol contribuye a la reducción del impacto ambiental de la actividad humana sobre el medio ambiente. Ante este escenario, se recomienda el fomento de los bosques sostenibles como fuente de materia prima para la construcción, para que de esta manera se pueda reducir el impacto y volver a la vez mas sostenible la industria de la construcción.

El presente estudio demuestra que, sin realizar cambios profundos en las materialidades o técnicas de construcción presentes en Chile, se puede minimizar en gran medida el impacto de la actividad de la construcción en la república, entregando así medidas concretas que permitan materializar las declaraciones de intenciones que ha mostrado el país con los compromisos ambientales a los que se ha comprometido el país.

La solución propuesta incrementa un 24% los recursos destinados a la envolvente de la vivienda, pero se ha de hacer énfasis que esta cantidad es sobre los recursos que se han destinado para la ejecución de la envolvente exclusivamente, si se toma este incremento sobre el total de los recursos, ajustados a las 550 UF totales disponibles, el incremento se convierte en un aumento presupuestario de 6%, que al aplicar el 25% de beneficio industrial y gastos indirectos y, posteriormente el gravamen del IVA, sería un presupuesto total de 581,45 UF.

Si el estado asumiese este aumento, y se incrementase el subsidio aportado de 520 UF a 552 UF no solo estaría contribuyendo a la materialización de esta reducción de la energía incorporada a las viviendas, sino que estaría quintuplicando la aislación térmica en los muros de fachada y aumentando en un 89% la de la cubierta, lo que mejoraría de forma sustancial en confort de la vivienda y de forma consiguiente la calidad de vida de sus usuarios finales.

Esta mejora en la aislación no solo mejoraría la calidad de vida en la vivienda de las familias, sino que también permitiría mejorar la situación económica, en especial de las familias vulnerables, al disminuir las necesidades de gasto en calefacción durante el invierno y, en menor medida, en refrigeración durante el verano.

La política habitacional chilena ha entendido que la forma de paliar la necesidad de vivienda en el país como la producción de soluciones habitacionales en masa que permitan alojar a las personas. Estas soluciones habitacionales, que han permitido a muchas familias la posibilidad de acceder a un hogar, solo se han limitado a proveer recintos funcionales, que cumplan los estándares mínimos requeridos buscando la minimización de su coste de construcción, sin atender a otras consideraciones, como la ambiental en este caso.

La aplicación de soluciones como la propuesta en el presente TFM permitirá, no solo mejorar la calidad de vida de las personas, sino orientar las políticas habitacionales chilenas hacia el cumplimiento de los objetivos medioambientales adquiridos por el país.

5.2 FUTURAS INVESTIGACIONES

Los resultados y conclusiones obtenidos en el presente TFM permiten abrir nuevas líneas de desarrollo, entre los que se encuentran:

- i. Aplicar la metodología a edificación en altura, edificación residencial fuera del ámbito del interés social y construcción no residencial.
- ii. Adaptar el modelo a la normativa térmica de otros países.
- iii. Adecuación de la normativa para que recoja los estándares necesarios que orienten las exigencias sobre las construcciones de manera que cumplan los objetivos ambientales del país y mejore el estándar de las viviendas de interés social en Chile.
- iv. Desarrollo de planes de producción sostenible de materiales que permita la reducción de la huella energética asociada a los materiales empleados en la construcción de viviendas.

6. *BIBLIOGRAFÍA*

6.1 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Omedes, «Salvando el 'Planeta A': Los nuevos movimientos contra el cambio climático,» *20 minutos*, 05 Diciembre 2019.
- [2] F. Celis Damico, R. García Alvarado, M. Trebilcock Kelly, O. Escorcía Oyola, U. Miotto Bruscato y M. Díaz, «Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile,» *Arquitecturarevista*, vol. 8, nº 1, pp. 62-75, Enero 2012.
- [3] International Energy Agency, «Energy Efficiency 2019,» 2019.
- [4] D. Soler, A. Salandín y J. C. Micó, «Lowest thermal transmittance of an external wall under budget, material and thickness restrictions: An integer linear programming approach,» *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 222-233, 1 Enero 2018.
- [5] E. Sicignano, G. Di Ruocco y R. Melella, «Mitigation strategies for reduction of embodied energy and carbon, in the construction system of contemporary quality architecture,» *Sustainability*, nº 3806, 2019.
- [6] D. Soler, A. Salandín y M. Bevivino, «Using integer Linear Programming to minimize the embodied CO2 emissions of the opaque part of a façade,» *Building and Environment*, vol. 177, 2020.
- [7] D. Soler y A. Salandín, «Computing the minimum construction cost of a building's external wall taking into account its energy efficiency,» *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 338, pp. 199-211, 2018.
- [8] R. McMullan, *Environmental science in building*, 7ª ed., Basingstoke, Nueva York: Palgrave Macmillan, 2012.
- [9] International Energy Agency, «Energy efficiency indicators highlights,» 2019.
- [10] R. H. Crawford y G. J. Treloar, «Validation of the use of Australian input-output data for building embodied energy simulation,» de *International Building Performance Simulation Association Conference*, Eindhoven, Países Bajos, 2003.
- [11] S. L. Trinidad Díaz, «Uso de la programación lineal entera para la mejora de la eficiencia energética de los edificio de nueva construcción en la República Dominicana mediante el control de la transmitancia térmica de sus muros exteriores.,» Valencia, 2019.
- [12] DUNA FM, «www.duna.cl,» Radio Duna, 14 12 2015. [En línea]. Available: <https://www.duna.cl/noticias/2015/12/14/cop21-los-compromisos-de-chile-para-el-acuerdo-climatico/>. [Último acceso: 06 02 2021].
- [13] Ministerio del Medio Ambiente de Chile, «Ministerio del Medio Ambiente,» 14 12 2014. [En línea]. Available: <https://mma.gob.cl/lideres-del-mundo-logran-acuerdo-historico-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [14] Ministerio del Medio Ambiente de Chile, «Plan de acción nacional de cambio climático 2017-2022,» Santiago de Chile.
- [15] Comisión Nacional de Energía - Ministerio de Energía de Chile, «Anuario estadístico de energía 2018,» Santiago de Chile, 2019.
- [16] International Efficiency Agency, «Data & Statistics - IEA,» [En línea]. Available: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=CHILE&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20\(TFC\)%20by%20sector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=CHILE&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20(TFC)%20by%20sector). [Último acceso: 24 01 2021].

- [17] C. M. Sanguinetti, Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de las viviendas en Chile, Concepción, Bío-Bío: Universidad del Bío-Bío, 2013.
- [18] Observatorio Urbano - Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, Viviendas particulares ocupadas según tipo de vivienda, Santiago de Chile, 2017.
- [19] J. Araneda Campos, Conjunto de viviendas sociales en el centro de Santiago, Santiago de Chile, Región Metropolitana: Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2015.
- [20] Cámara Chilena de la Construcción, «Déficit de viviendas en Chile | Déficit Habitacional CCHC | Cámara Chilena de la Construcción,» [En línea]. Available: <https://www.cchc.cl/2019/deficit-habitacional>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [21] Á. Rivera, «Historia de la política habitacional en el área metropolitana de Santiago,» *Revista CIS*, vol. 16, nº 16, pp. 27-44, 2012.
- [22] Pontificia Universidad Católica de Chile, «Determinan vulnerabilidad sísmica de viviendas de Chile - PUCCh,» 03 03 2016. [En línea]. Available: <https://www.uc.cl/noticias/foto-determinan-vulnerabilidad-sismica-de-viviendas-en-chile/>. [Último acceso: 24 04 2021].
- [23] J. M. Grawe, «Modelamiento matemático,» Vaparaíso, 2015.
- [24] D. de la Fuente García, J. Parreño Fernández, I. Fernández Quesada, R. Pino Díez, A. Gómez Gómez y A. Puente García, Ingeniería de organización en la empresa: Dirección de operaciones, Oviedo, Asturias: Ediciones de la Universidad de Oviedo, 2008.
- [25] H. A. Taha, Investigación de operaciones, México: Pearson Educación, 2012.
- [26] Gurobi, «Gurobi Optimizer,» [En línea]. Available: <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [27] GAMS, «GAMS - Cutting Edge Modeling,» [En línea]. Available: <https://www.gams.com/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [28] Lindo Systems, «Home - Lindo Systems,» [En línea]. Available: <https://www.lindo.com/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [29] Wolfram Research, «Wolfram Mathematica: Computación Técnica Moderna,» [En línea]. Available: <https://www.wolfram.com/mathematica/?source=nav>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [30] Biblioteca Nacional de Chile, «Geografía - Memoria Chilena,» [En línea]. Available: <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-94271.html>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [31] Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile, «Organización Territorial,» [En línea]. Available: <https://chile.gob.cl/chile/sobre-chile/asi-es-chile/organizacion-territorial>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [32] Universia, «Clima en Chile,» [En línea]. Available: <https://www.universia.es/estudiar-extranjero/chile/salir/clima/4182>. [Último acceso: 05 02 2021].
- [33] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Manual de Aplicación de Reglamentación Térmica, Santiago: Instituto de la Construcción, 2006.
- [34] Ministerio de Fomento de España, CTE Ahorro de energía, Madrid, Comunidad de Madrid, 2019.

- [35] Instituto Nacional de Normalización (Chile), NCh1928.Of1993 Mod2003 Albañilería armada - Requisitos para el diseño y cálculo, Santiago, 2003.
- [36] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Manual del Albañil de Ladrillos Cerámicos, Primera ed., Santiago, 2010.
- [37] Corporación Chilena la Madera, Manual de Construcción de Viviendas en Madera, Santiago.
- [38] Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, Tabiques Exteriores Recomendaciones Técnicas, Primera ed., Santiago de Chile, 2016.
- [39] CINTAC, Manual de Construcción Perfiles y Estructuras, Santiago, 2016.
- [40] Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, «D.S. N°1 (V. y U.), de 2011 - ACT.21.06.2017 Reglamento Integrado de Subsidio Habitacional,» *Diario Oficial*, 21 06 2017.
- [41] Rankia, «¿Qué moneda es UF en Chile? - Rankia,» 12 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.rankia.cl/blog/mejores-opiniones-chile/4119639-que-moneda-uf-chile>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [42] Servicio de Impuestos Internos, «SII,» [En línea]. Available: http://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2020.htm. [Último acceso: 06 02 2021].
- [43] SERVIU, «Tabla referencial de precios unitarios V3,» 2017.
- [44] «Base de datos Casaclima/Klimahous,» [En línea]. Available: <https://www.agenziacasaclima.it/it/home-1.html>. [Último acceso: 06 02 2021].
- [45] Diario Expansión, «datosmacro.com,» [En línea]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/impuestos/iva/chile>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [46] Servicio de Impuestos Internos, «Preguntas Frecuentes - Servicio de Impuestos Internos,» [En línea]. Available: https://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/iva/001_030_1873.htm. [Último acceso: 06 02 2021].

7. ANEXOS

ANEXO 1: ZONAS TÉRMICAS

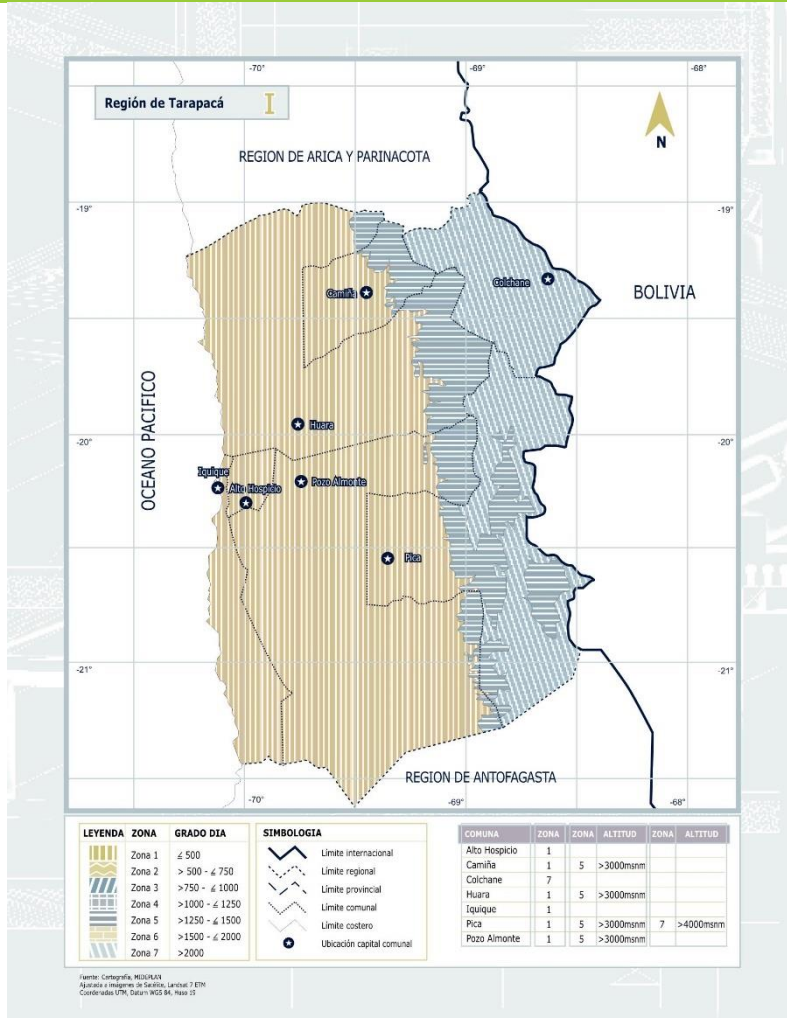


Figura 36 Zonas térmicas Región de Tarapacá (MINVU)

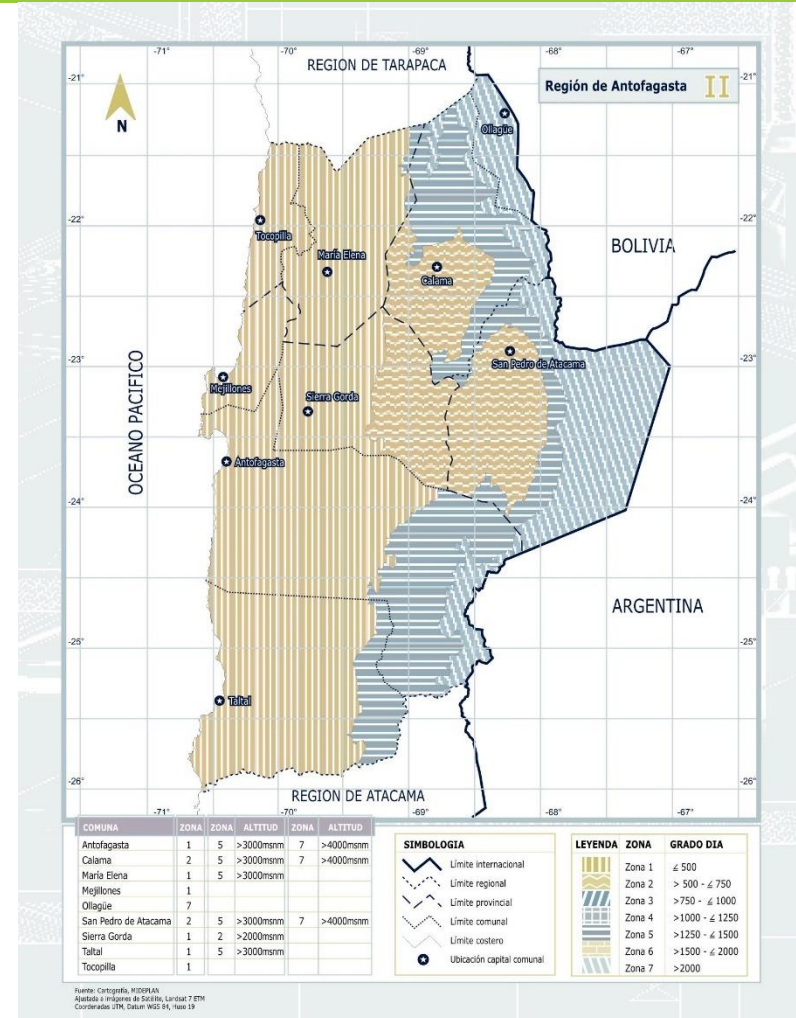


Figura 37 Zonas térmicas Región de Antofagasta (MINVU)

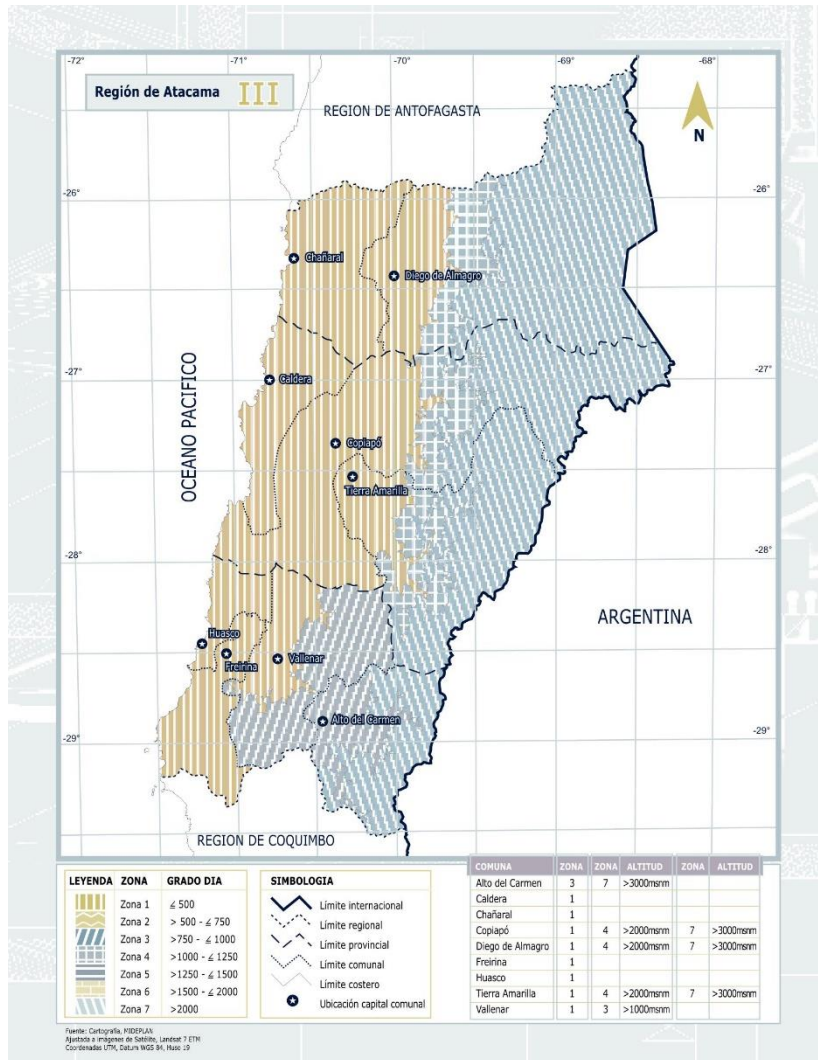


Figura 38 Zonas térmicas Región de Atacama (MINVU)

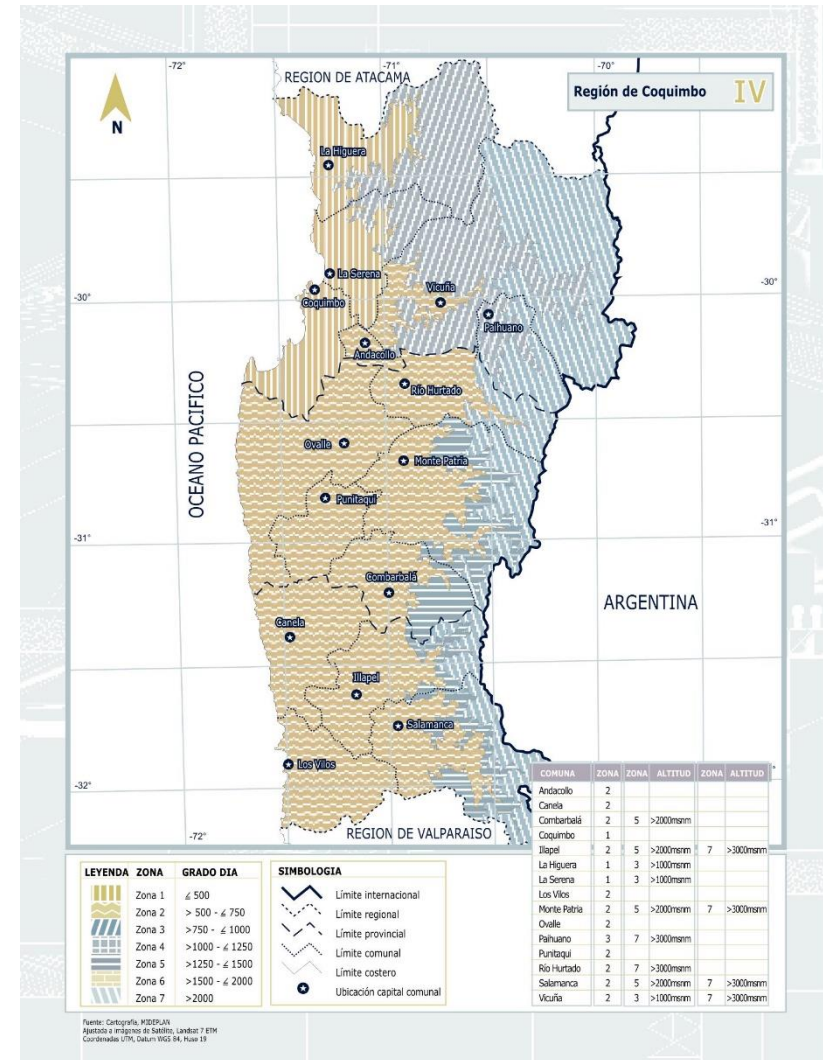


Figura 39 Zonas térmicas Región de Coquimbo (MINVU)

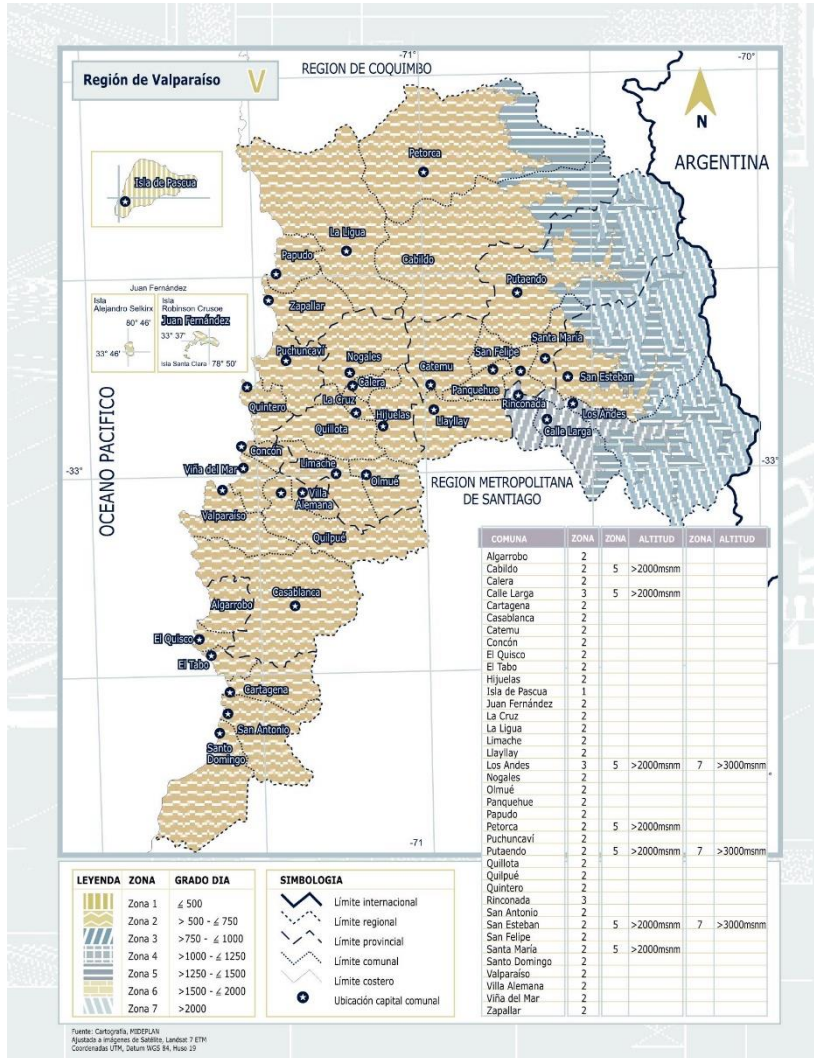


Figura 40 Zonas térmicas Región de Valparaíso (MINVU)

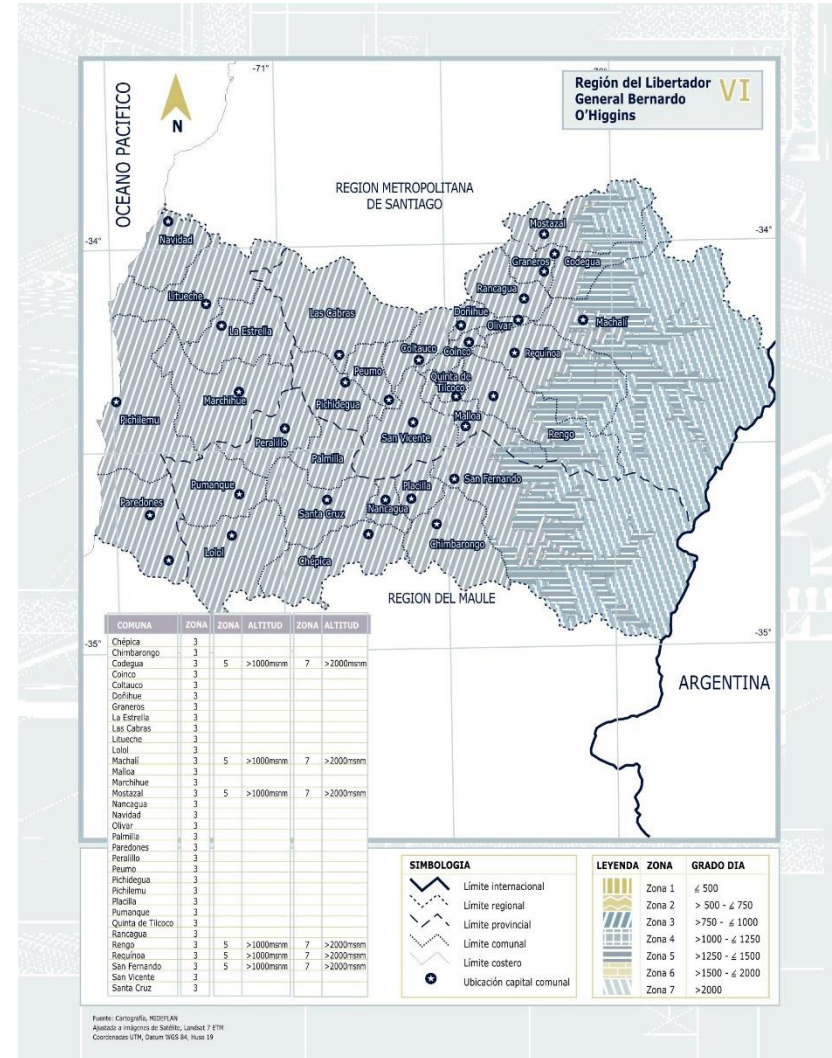


Figura 41 Zonas térmicas Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins (MINVU)

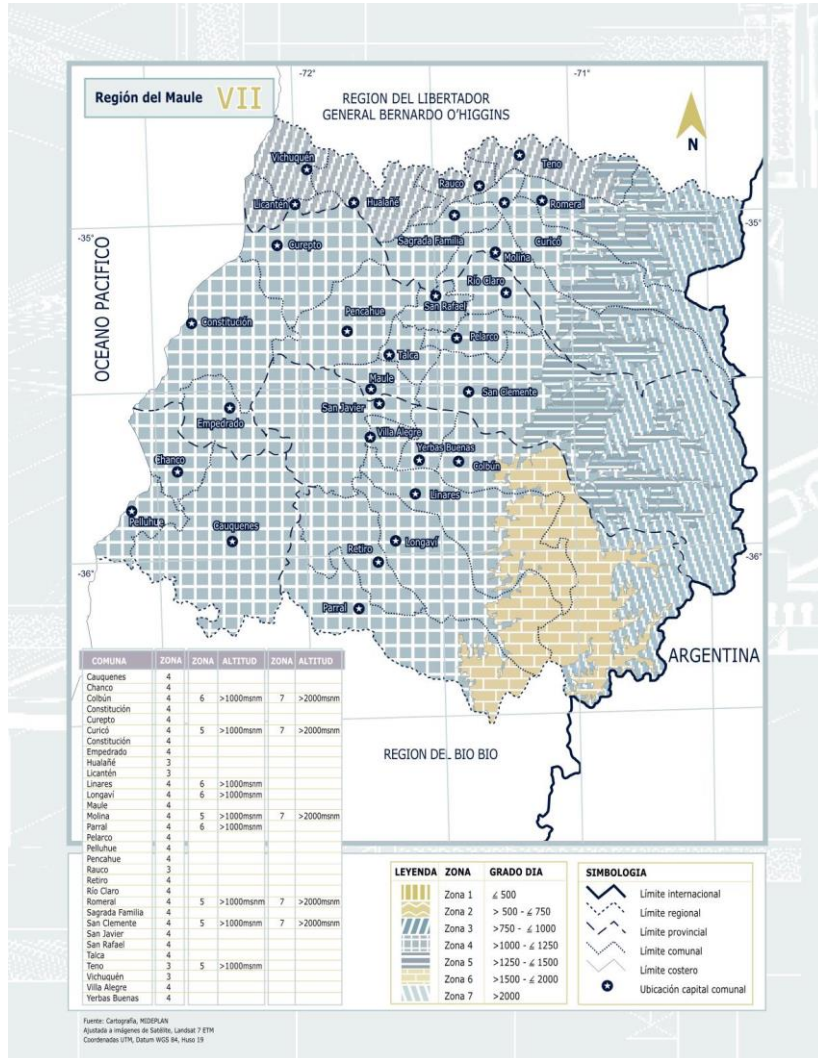


Figura 42 Zonas térmicas Región del Maule (MINVU)

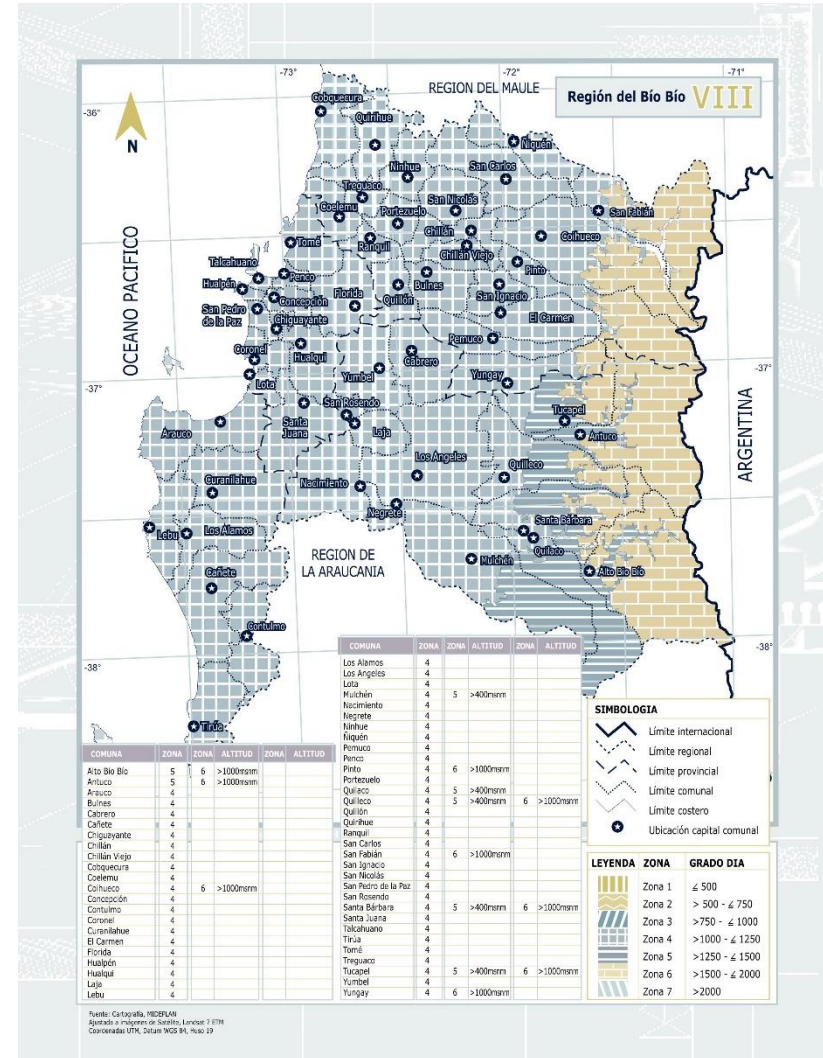


Figura 43 Zonas térmicas Región del Bío Bío (MINVU)

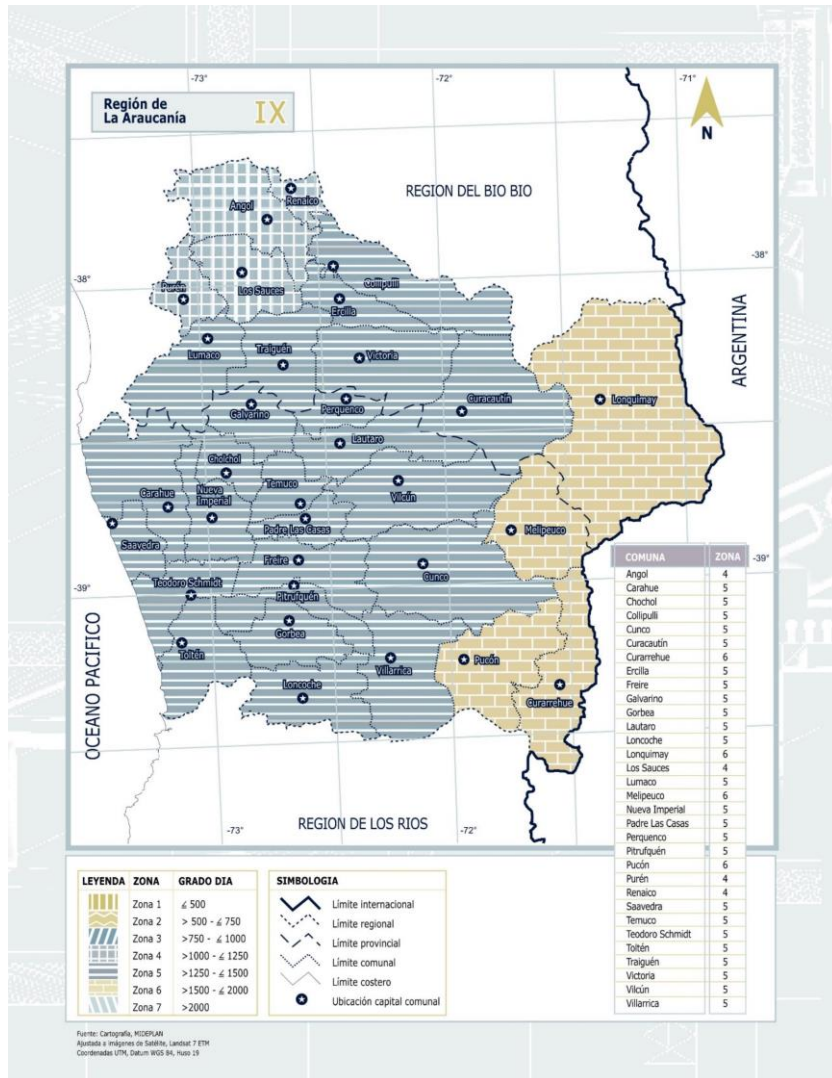


Figura 44 Zonas térmicas Región de La Araucanía (MINVU)

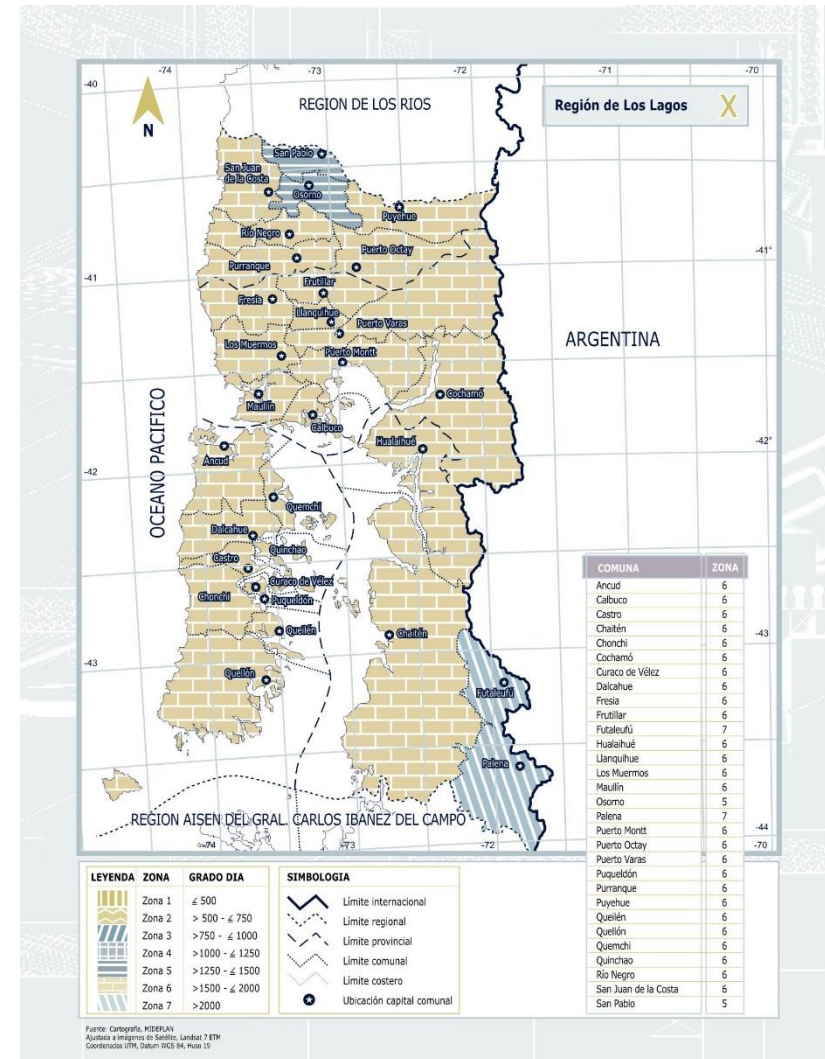


Figura 45 Zonas térmicas Región de Los Lagos (MINVU)

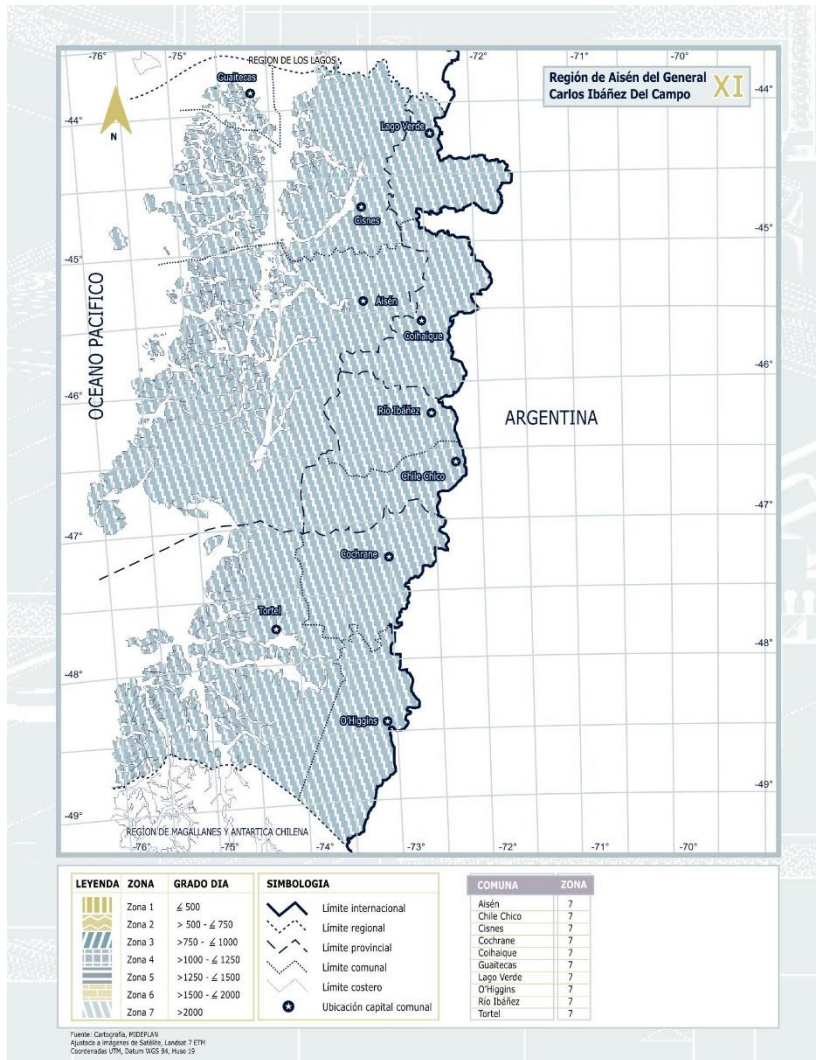


Figura 46 Zonas térmicas Región de Aisén del Gral. C. Ibáñez del Campo (MINVU)

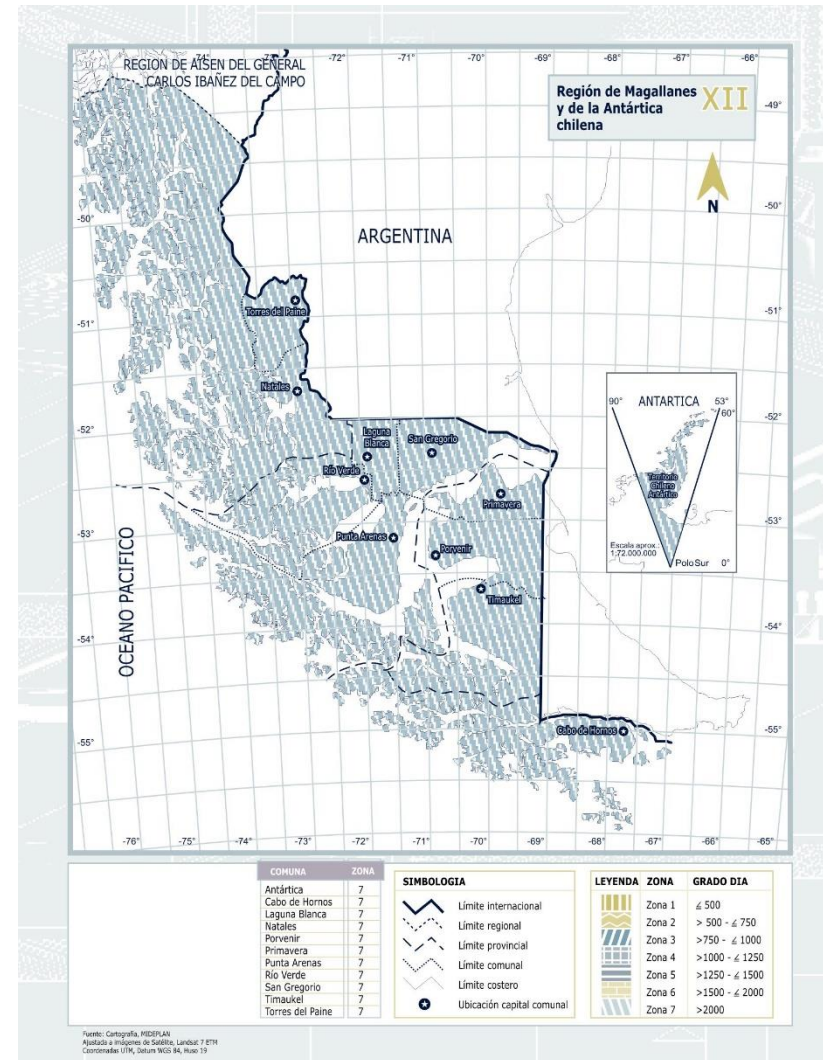


Figura 47 Zonas térmicas Región de Magallanes y Antártica chilena (MINVU)

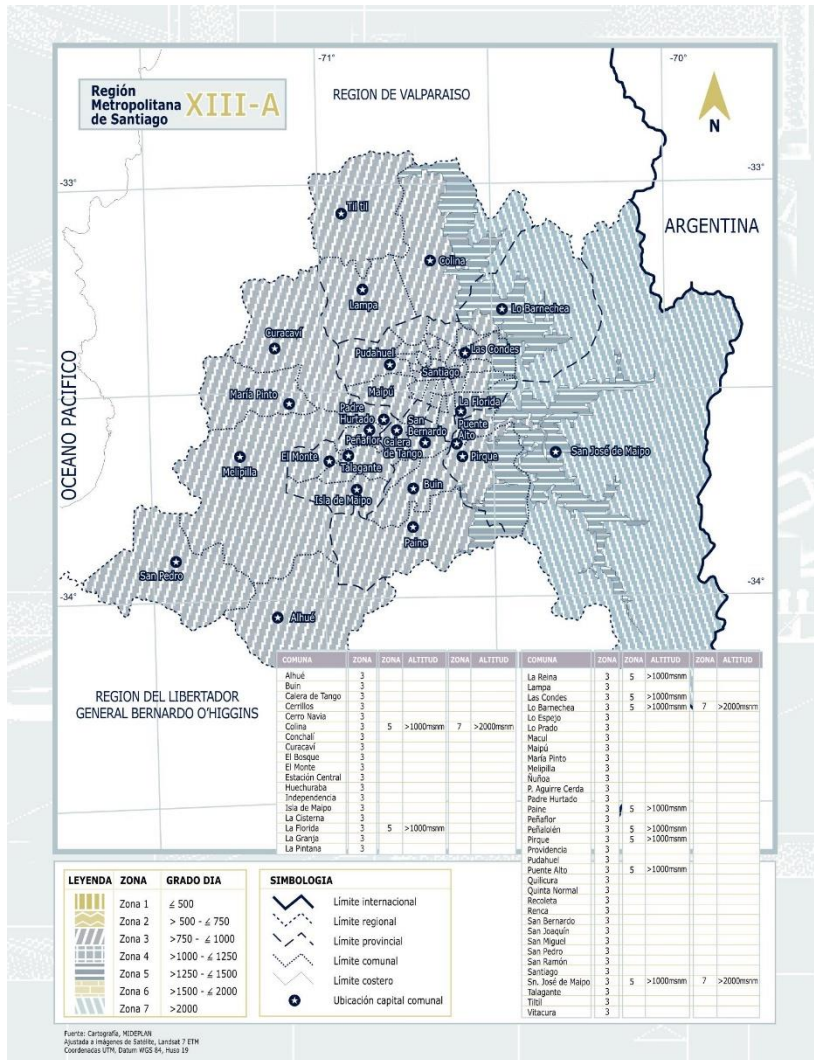


Figura 48 Zonas térmicas Región de Metropolitana de Santiago (a) (MINVU)

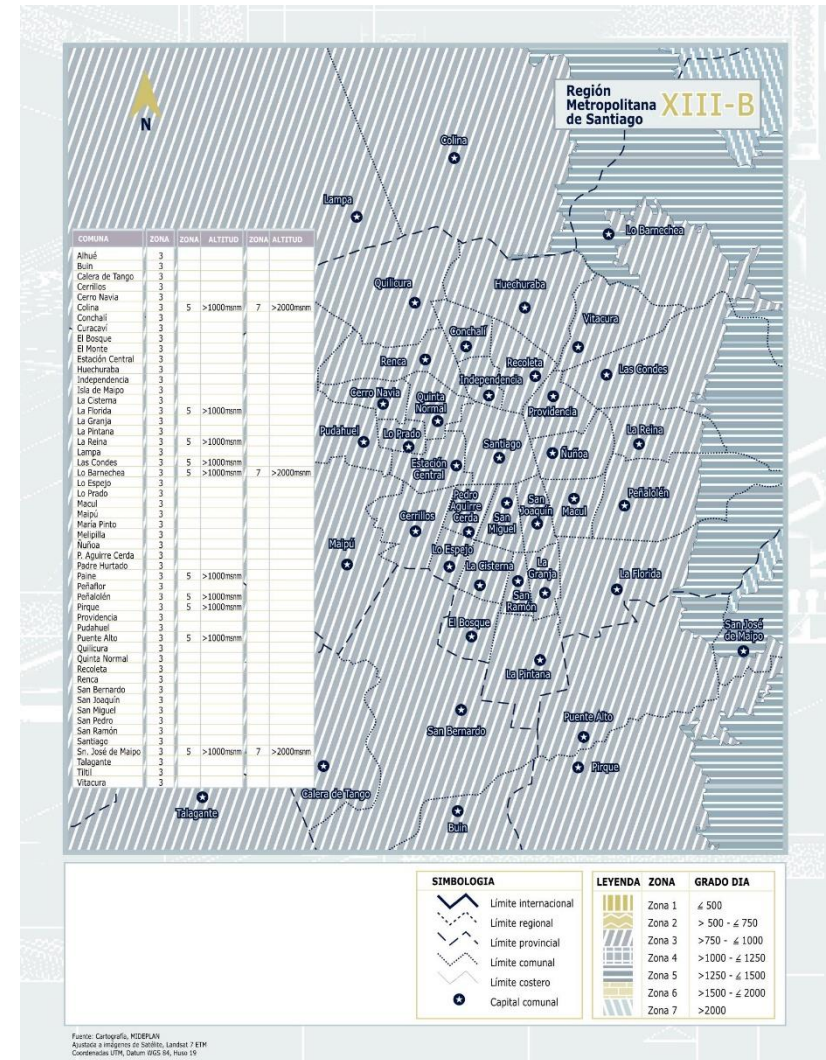


Figura 49 Zonas térmicas Región de Metropolitana de Santiago (b) (MINVU)

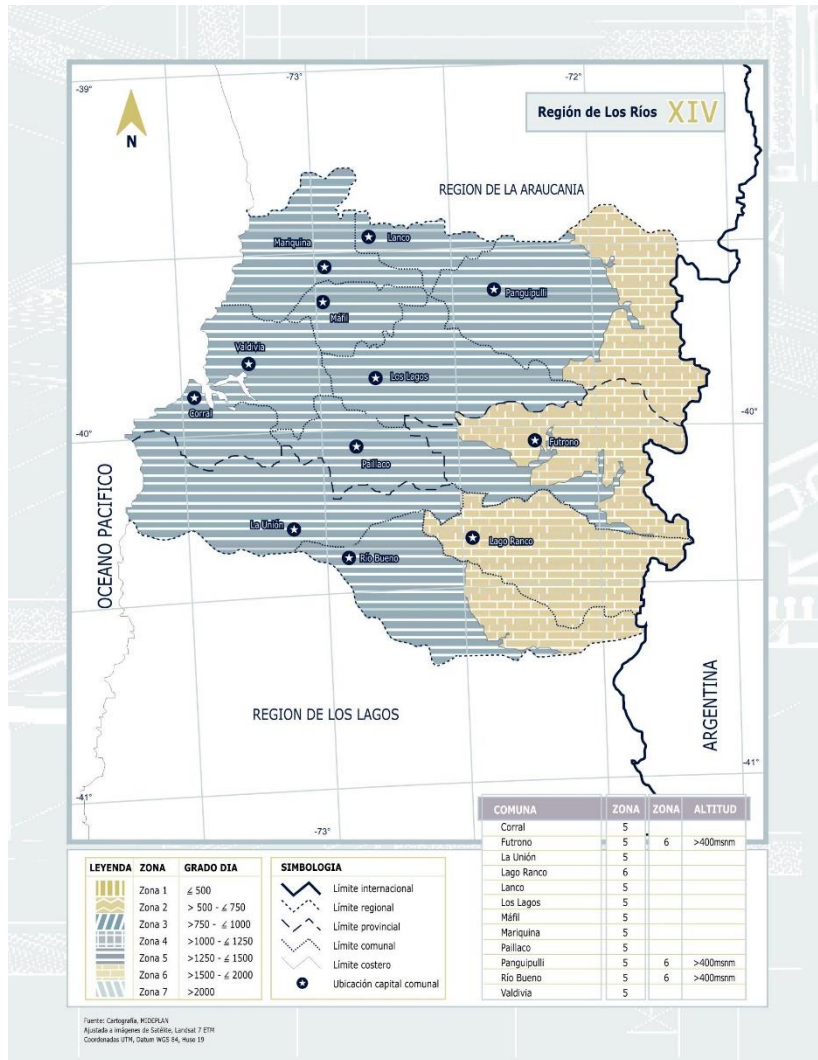


Figura 50 Zonas térmicas Región de Los Ríos (MINVU)

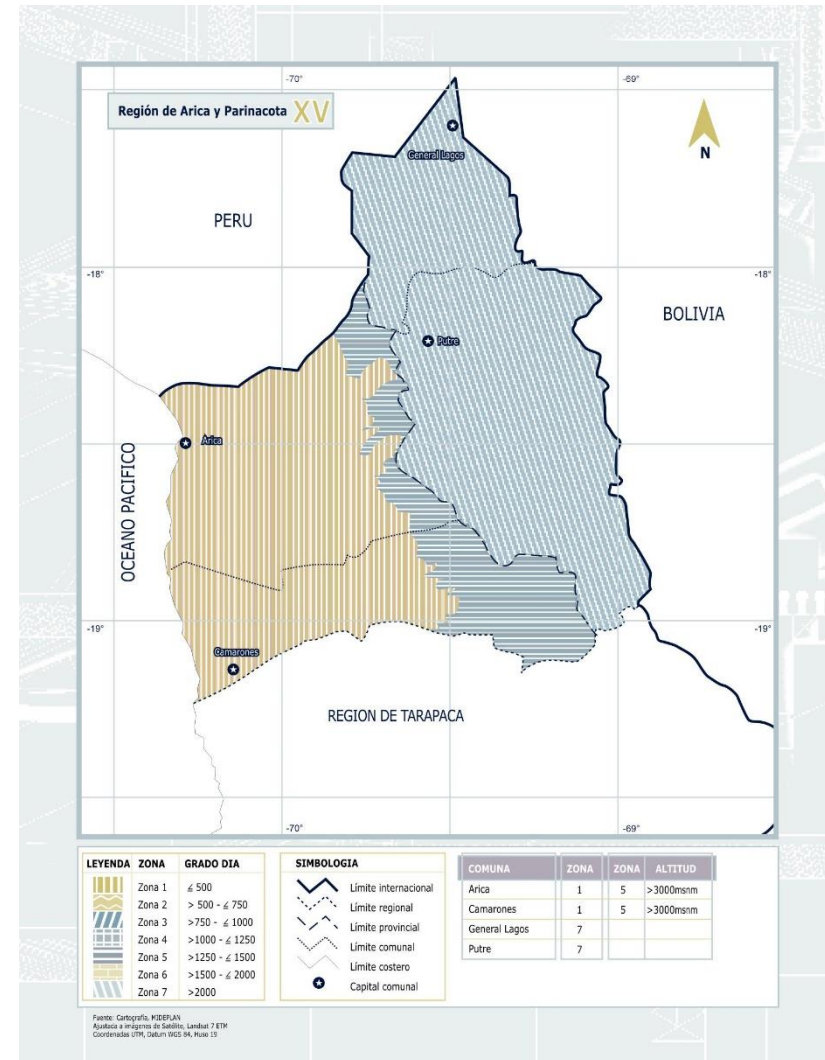


Figura 51 Zonas térmicas Región de Arica y Parinacota (MINVU)

ANEXO 2: TABLA DE MATERIALES

Tabla 10 Tabla de materiales (propia)

Material	Variable	Min	Término	Coste	Superficie	Coste total	Espesor	t/λ	λ
Pintura 2 manos	x111	552,364	552,363960356547 x111	0,09	77,91	7,27	0,20	0,0003	0,6000
Revestimiento Vynil Siding exterior PVC	x121	6.244,744	6244,74384820608 x121	0,18	77,91	14,07	8,00	0,0421	0,1900
Placa de fibrocemento 120x240cm x 8mm + fieltro	x211	13.341,929	13341,928865238 x211	0,25	77,91	19,32	8,00	0,0138	0,5800
Placa de fibrocemento 120x240cm x 6mm + fieltro	x212	9.985,731	9985,73052262689 x212	0,23	77,91	17,62	6,00	0,0103	0,5800
Albañilería armada	x311	50.202,965	50202,9649127342 x311	0,41	77,91	32,12	140,00	0,3889	0,3600
Albañilería confinada	x321	50.202,965	50202,9649127342 x321	0,41	77,91	32,12	140,00	0,1400	1,0000
Tabique metalcon	x331	44.037,678	44037,6780223303 x331	0,13	77,91	10,03	40,00	0,0007	60,0000
Tabiquería de madera	x341	1.498,952	1498,95150742002 x341	0,13	77,91	10,31	76,20	0,5080	0,1500
Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	x411	-	0 x411	-	77,91	-	30,00	0,3750	0,0800
Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	x412	-	0 x412	-	77,91	-	50,00	0,5556	0,0900
Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	x413	-	0 x413	-	77,91	-	80,00	0,8889	0,0900
Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	x414	-	0 x414	-	77,91	-	100,00	1,1111	0,0900
Cámara de aire no ventilada 30mm	x415	-	0 x415	-	77,91	-	30,00	0,1765	0,1700
Cámara de aire no ventilada 50mm	x416	-	0 x416	-	77,91	-	50,00	0,2778	0,1800
Cámara de aire no ventilada 80mm	x417	-	0 x417	-	77,91	-	80,00	0,4444	0,1800
Cámara de aire no ventilada 100mm	x418	-	0 x418	-	77,91	-	100,00	0,5556	0,1800
Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m3	x511	10.700,866	10700,8661560678 x511	0,16	77,91	12,09	50,00	1,2195	0,0410
Lana de vidrio R122 35 kg/m3	x521	5.765,015	5765,01537994557 x521	0,09	77,91	6,76	50,00	1,2500	0,0400
Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m3	x512	34.242,772	34242,7716994169 x512	0,07	77,91	5,22	80,00	1,9512	0,0410
Tabique metalcon	x611	44.037,678	44037,6780223303 x611	0,13	77,91	10,03	40,00	0,0007	60,0000
Tabiquería de madera	x621	1.498,952	1498,95150742002 x621	0,13	77,91	10,31	76,20	0,5080	0,1500
Tabiquería madera 2x2	x622	427,645	427,644853994687 x622	0,04	77,91	3,05	50,80	0,3387	0,1500
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm + enlucido	x711	4.284,703	4284,70334291202 x711	0,21	77,91	16,53	11,50	0,0548	0,2100
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm + enlucido	x712	6.863,459	6863,45866204082 x712	0,22	77,91	17,12	16,50	0,0786	0,2100
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm + enlucido	x713	2.969,538	2969,53813015634 x713	0,19	77,91	14,76	9,50	0,0452	0,2100
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 10mm	x721	2.819,451	2819,45066061048 x721	0,08	77,91	6,29	10,00	0,0476	0,2100
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 15mm	x722	4.516,342	4516,34226190382 x722	0,09	77,91	6,88	15,00	0,0714	0,2100
Yeso cartón (yeso laminado) 120x240 cm 8mm	x723	1.954,036	1954,03594395087 x723	0,06	77,91	4,52	8,00	0,0381	0,2100
Pintura 2 manos	x811	552,364	552,363960356547 x811	0,09	77,91	7,27	0,20	0,0003	0,6000
Plancha acanalada onda zinc 0,35x851x3000	x911	16.527,722	16527,7217432211 x911	0,12	60,83	7,57	0,35	0,0000	200,0000
Teja	x921	805,561	805,560950218008 x921	0,35	60,83	21,02	14,00	0,0140	1,0000
Fieltro asfáltico	x1011	28,033	28,0334174745816 x1011	0,00	60,83	0,06	0,50	0,0022	0,2300
Cámara de aire ligeramente ventilada 30mm	x1111	-	0 x1111	-	60,83	-	30,00	0,3750	0,0800
Cámara de aire ligeramente ventilada 50mm	x1112	-	0 x1112	-	60,83	-	50,00	0,5556	0,0900
Cámara de aire ligeramente ventilada 80mm	x1113	-	0 x1113	-	60,83	-	80,00	0,8889	0,0900
Cámara de aire ligeramente ventilada 100mm	x1114	-	0 x1114	-	60,83	-	100,00	1,1111	0,0900
Cámara de aire no ventilada 30mm	x1115	-	0 x1115	-	60,83	-	30,00	0,1765	0,1700
Cámara de aire no ventilada 50mm	x1116	-	0 x1116	-	60,83	-	50,00	0,2778	0,1800
Cámara de aire no ventilada 80mm	x1117	-	0 x1117	-	60,83	-	80,00	0,4444	0,1800
Cámara de aire no ventilada 100mm	x1118	-	0 x1118	-	60,83	-	100,00	0,5556	0,1800
Poliestireno 1,2x0,6m x 50 mm 10 kg/m3	x1211	8.354,611	8354,61114310865 x1211	0,16	60,83	9,44	50,00	1,2195	0,0410
Poliestireno 1,2x0,6m x 80 mm 10 kg/m3	x1212	26.734,756	26734,7556579477 x1212	0,07	60,83	4,08	80,00	1,9512	0,0410
Lana de vidrio R122 35 kg/m3	x1221	4.500,987	4500,98721271969 x1221	0,09	60,83	5,28	50,00	1,2500	0,0400
Cercha madera	x1311	443,535	443,534633376487 x1311	0,05	60,83	3,16	0,00	-	0,1500
Cercha metalcon	x1321	16.353,762	16353,7622074881 x1321	0,13	60,83	8,00	40,00	0,0007	60,0000