



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



**EVALUACIÓN DE OPCIONES DE CALEFACCIÓN RESIDENCIAL
PARA REDUCIR EMISIONES AL MINIMO COSTO**

POR

Fernando Emilio Albornoz Montenegro

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía

Dr. Cristian Mardones Poblete

Septiembre 2022

Concepción (Chile)

© 2022 Fernando Emilio Albornoz Montenegro

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a mi profesor guía Cristian Mardones, quien me dio la oportunidad de realizar esta investigación, me guió y me apoyó cada vez que lo necesité. Agradecerle también por motivarme a realizar mis acciones de la mejor forma posible, enseñanza de gran valor.

A mis amigos y amigas universitarias, quienes fueron parte de mi carrera y me acompañaron en los buenos y malos momentos. Sin ustedes nada habría sido igual.

A mis padres y a mi hermano que me acompañan y motivan a seguir todos los días. Gracias por todas las herramientas y posibilidades que me han dado y por sobre todo gracias por el amor que me entregan siempre. Y a mi polola, que ha sido mi pilar fundamental durante este proceso, acompañándome, animándome en los momentos más difíciles, entregándome su amor y cariño día a día.

A todos ustedes muchas gracias.

RESUMEN

El presente estudio busca simular el comportamiento de los hogares sobre la elección de calefacción ante diversos escenarios de regulación o políticas a través de un problema de minimización de costos sujeto a restricciones ambientales. Para lograr el objetivo propuesto, se utilizan datos provenientes de la encuesta CASEN 2013.

En primer lugar, se presentan las opciones de calefacción consideradas en el estudio. En segundo lugar, se calculan las emisiones de los diversos contaminantes para cada hogar y opción. Finalmente, se aplica un modelo de optimización en el software GAMS para encontrar la opción que minimice los costos de recambio para cada hogar, sujeto a metas de reducción de emisiones de material particulado fino ($MP_{2,5}$).

En cuanto a los resultados, los costos totales de cumplimiento crecen cuando las metas de reducción son más exigentes y los costos por tonelada reducida son más bajos en zonas con mayor consumo promedio de leña por hogar. Las opciones de calefacción más adoptadas por los hogares con alto consumo de leña son calefactores a pellet y la opción preferida por hogares con bajo consumo de leña es el aire acondicionado. Además, el reacondicionamiento térmico resulta no ser costo-efectivo cuando el objetivo es reducir emisiones de $MP_{2,5}$. El orden en que se reemplazan los calefactores a leña está directamente relacionado con la eficiencia, siendo primero reemplazados los menos eficientes y en último lugar los más eficientes. Las emisiones de carbono negro se reducen proporcionalmente con las de $MP_{2,5}$, mientras que las emisiones de CO_2 equivalente presentan reducciones hasta una meta del 80% y luego, cuando la meta de reducción es igual a 99%, estas aumentan en relación con el escenario base.

El estudio muestra que las opciones de recambio más costo-efectivas son el aire acondicionado y los calefactores a pellet, y que, además, reducir cantidades cercanas al 100% de las emisiones de $MP_{2,5}$ es muy costoso y tiene incidencia en las metas de carbono neutralidad del país.

ABSTRACT

The present study seeks to simulate the behavior of households on the choice of heating in various regulatory or policy scenarios through a cost minimization problem subject to environmental restrictions. To achieve the proposed objective, data from the CASEN 2013 survey are used.

First, the heating options considered in the study are presented. Second, the emissions of the various pollutants are calculated for each household and option. Finally, an optimization model is applied in the GAMS software to find the option that minimizes replacement costs for each home, subject to goals for reducing emissions of fine particulate matter (PM_{2.5}).

Regarding the results, the total compliance costs grow when the reduction goals are more demanding and the costs per reduced ton are lower in areas with higher average consumption of firewood per household. The heating options most adopted by homes with high firewood consumption are pellet heaters and the preferred option for homes with low firewood consumption is air conditioning. Furthermore, thermal reconditioning turns out to be not cost-effective when the objective is to reduce PM_{2.5} emissions. The order in which wood heaters are replaced is directly related to efficiency, with the least efficient being replaced first and the most efficient last. Black carbon emissions are reduced proportionally with those of PM_{2.5}, while CO₂ equivalent emissions present reductions up to a target of 80% and then when the reduction target is equal to 99%, they increase in relation to the scenario base.

The study shows that the most cost-effective replacement options are air conditioning and pellet heaters, and in addition, reducing an amount close to 100% of PM_{2.5} emissions is very costly and has an impact on the goals of carbon neutrality of the country.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivos generales.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.1.3	Justificación del tema.....	3
1.3.	Estructura de la memoria de titulo.....	3
2.	REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1.	Calefacción residencial en Chile.....	4
2.2.	Aislación de las viviendas en Chile.....	5
2.3.	Causas de la contaminación por MP _{2,5}	6
2.4.	Medidas para disminuir la contaminación por MP _{2,5}	7
2.5.	Modelos de optimización calibrados con microdatos a nivel de hogar.....	8
3.	METODOLOGIA.....	10
3.1.	Encuesta para la caracterización de hogares.....	10
3.2.	Opciones de calefacción residencial.....	11
3.3.	Estimación del consumo energético equivalente.....	14
3.4.	Estimación de emisiones de MP _{2,5}	15
3.5.	Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero.....	17
3.6.	Estimación de los costos para las opciones de calefacción residencial.....	20
3.7.	Modelo de optimización.....	22
3.8.	Escenarios.....	25
4.	RESULTADOS.....	27
4.1.	Emisiones iniciales por combustión residencial de leña según PDA.....	27
4.2.	Simulaciones con el modelo de optimización.....	28
4.2.1	PDA del Valle Central de la región de O'Higgins.....	29
4.2.2	PDA de Talca y Maule.....	30
4.2.3	PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó.....	32
4.2.4	PDA de Chillán y Chillán Viejo.....	33

4.2.5	PDA de Los Ángeles	34
4.2.6	PDA de Concepción Metropolitano	36
4.2.7	PDA de Temuco y Padre las Casas	38
4.2.8	PDA de Valdivia.....	39
4.2.9	PDA de Osorno.....	41
4.2.10	PDA Coyhaique y su zona circundante	42
4.2.11	Análisis consolidado en zonas con PDA del centro-sur de Chile.....	44
4.3.	Opciones de calefacción reemplazadas.....	46
5.	CONCLUSIONES.....	48
6.	REFERENCIAS	50
7.	ANEXOS	57
7.1.	Anexo 1. Comunas con PDA.....	57
7.2.	Anexo 2. Cantidad de calefactores a leña reemplazados en cada PDA	59
7.3.	Anexo 3. Imagen y enlace de cada opción de calefacción.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Cantidad de hogares incluidos en el estudio según PDA	11
Tabla 3.2: Participación de calefactores a leña en hogares chilenos	11
Tabla 3.3: Opciones de calefacción incluidas en el estudio	13
Tabla 3.4: Eficiencia térmica de los calefactores	15
Tabla 3.5: Factores de emisión de MP _{2,5} según calefactor	17
Tabla 3.6: Factores de emisión según combustible y valor del GWP	18
Tabla 3.7: Razón entre carbono negro y material particulado fino	20
Tabla 3.8: Precios de combustibles según región del PDA	22
Tabla 4.1: Cantidad de hogares que usan calefactores a leña y consumo promedio de leña según PDA	27
Tabla 4.2: Emisiones totales por combustión residencial de leña según contaminante (ton/año).....	28
Tabla 4.3: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Valle Central de la región de O'Higgins	30
Tabla 4.4: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Talca y Maule	31
Tabla 4.5: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó	33
Tabla 4.6: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Chillán y Chillán Viejo.....	34
Tabla 4.7: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Los Ángeles	36
Tabla 4.8: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Concepción Metropolitana	37
Tabla 4.9: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Temuco y Padre las Casas	39
Tabla 4.10: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Valdivia	41
Tabla 4.11: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Osorno	42
Tabla 4.12: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Coyhaique y su zona circundante	44
Tabla 4.13: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en todas las zonas con PDA del centro-sur de Chile.....	46

Tabla 4.14: Cantidad de calefactores a leña reemplazados en todas las zonas con PDA del centro-sur de Chile.....	47
Tabla 7.1: Comunas con PDA	57
Tabla 7.2: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins.....	59
Tabla 7.3: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Talca y Maule	59
Tabla 7.4: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó	60
Tabla 7.5: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Chillán y Chillán Viejo	60
Tabla 7.6: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Los Ángeles	61
Tabla 7.7: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Concepción	61
Tabla 7.8: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Temuco y Padre las Casas.....	62
Tabla 7.9: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Valdivia	62
Tabla 7.10: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Osorno	63
Tabla 7.11: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Coyhaique y su zona circundante.....	63
Tabla 7.12: Imagen y enlace de cada opción de calefacción.....	64

1. INTRODUCCION

1.1. Motivación

En la zona centro-sur de Chile la población necesita calefaccionar sus hogares durante temporada otoño-invierno debido a las bajas temperaturas existentes. Para esto, existen diversas opciones, pero los calefactores a leña tienen la mayor participación nacional, representando un 74% (Ministerio de Energía, 2020) de las preferencias. Este tipo de calefactores emiten material particulado fino ($MP_{2,5}$) y otros contaminantes, lo cual ha generado diversos problemas de salud en la población debido su uso masivo. En Chile, el 60% de la población que vive en áreas urbanas está expuesta a altas concentraciones de $MP_{2,5}$ (Huneus et al., 2020). La exposición a concentraciones de $MP_{2,5}$ a través del tiempo puede provocar efectos acumulativos o crónicos en la salud de las personas, provocando incluso la muerte por enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cáncer de pulmón u otras enfermedades (Pope et al., 2020; Chen & Hoek, 2020; Lin et al., 2016).

Una forma de reducir las emisiones de $MP_{2,5}$ provenientes de la calefacción residencial por combustión a leña es prohibir su uso. Sin embargo, los hogares chilenos poseen serios problemas de pobreza energética (Calvo et al., (2022), por lo tanto, esta medida incrementaría la magnitud del problema. Los ingresos bajos de los hogares, sumado al bajo precio de la leña en comparación con otros combustibles y el nivel de confort térmico que entrega (Pérez-Fargallo et al., 2020), hacen que sea la opción preferida por los hogares. Una de las primeras medidas adoptadas por el Ministerio del Medioambiente para reducir la contaminación residencial fue la implementación de regulaciones para la certificación de los nuevos equipos a leña comercializados en el país. Estas certificaciones están a cargo de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y para obtenerse, los equipos deben cumplir protocolos de seguridad, eficiencia energética y emisiones de material particulado. Lo anterior, se ha complementado con programas para subsidiar la renovación y sustitución de los calefactores de leña y el mejoramiento térmico de las viviendas, entre otras medidas.

En el mercado existen diversas alternativas de calefacción que generan menores emisiones de $MP_{2,5}$ que un calefactor a leña, tales como calefacción central, calefactor a pellet, calefactor a gas natural, calefactor a gas licuado, calefactor a parafina convencional, a parafina con tiro forzado, calefactor eléctrico convencional, aire acondicionado convencional

y aire acondicionado con tecnología Inverter (Ministerio del Medioambiente, 2020). Sin embargo, la limitación principal para el recambio de calefactores a leña son los costos que deben enfrentar los hogares ya que muchas veces los equipos menos contaminantes requieren una alta inversión o el nuevo combustible es más costoso o difícil de conseguir. Otra alternativa para disminuir emisiones es reducir la necesidad de calefacción a través de un mejor aislamiento térmico en las viviendas existentes, pero esta opción también involucra una inversión relevante. Por otra parte, los programas de recambio de calefactores y mejoramiento térmico del gobierno tienen recursos limitados y su financiamiento se enfoca en zonas con planes de descontaminación, por lo cual es importante evaluar opciones técnicas y económicamente factibles para la reducción de emisiones a través de indicadores de costo-efectividad.

Finalmente, el análisis de los efectos directos e indirectos que puede generar la masiva sustitución de los calefactores a leña es importante, ya que se reduciría la contaminación local del aire, pero también podría elevar las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso más intensivo de gas, parafina o electricidad.

1.2. Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

Simular el comportamiento de los hogares sobre la elección de calefacción ante diversos escenarios de regulación o políticas a través de un problema de minimización de costos sujeto a restricciones ambientales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar las diversas opciones de calefacción para los hogares chilenos que sean técnica y económicamente factibles en la actualidad.
- Recopilar información sobre los costos de inversión, costos de operación y emisiones de las tecnologías factibles para calefaccionar los hogares, así como también, los costos de inversión para un mejoramiento térmico de las viviendas.
- Buscar datos sobre consumo de combustibles para calefacción a nivel de hogar.
- Buscar factores de emisión y estimar las emisiones de cada hogar considerando la situación base y todas las alternativas de calefacción disponibles.

- Investigar las actuales regulaciones en términos ambientales.
- Modelar la situación base y simular políticas ambientales a través de un problema de optimización calibrado con microdatos.
- Obtener implicancias para el mejoramiento de las políticas ambientales.

1.1.3 Justificación del tema

El aporte de esta memoria de título es encontrar alternativas costo-efectivas que permitan reducir la contaminación del aire generada por fuentes residenciales. El problema de la contaminación por calefacción residencial, tanto de contaminantes locales del aire como gases de efecto invernadero, se puede resolver a través de la sustitución de los calefactores más contaminantes o mejorando el aislamiento térmico de las viviendas. Esta renovación de calefactores tiene costos asociados, los cuales serán distintos para cada hogar dependiendo de muchas variables, tales como la superficie a calefaccionar, el número de habitaciones, el nivel de aislación que exista en el hogar, el método de calefacción que se esté utilizando en la actualidad, entre otras. En los últimos años, ha crecido el número de planes de descontaminación en las ciudades del centro-sur de Chile y se han implementado algunas restricciones temporales para el uso de calefactores a leña en los días de mayor contaminación, éstas últimas probablemente se incrementarán en los próximos años. Por otro lado, el país se ha comprometido con alcanzar la carbono-neutralidad al 2050 así que la masiva sustitución de combustibles para calefacción residencial puede apoyar el alcance de esta meta. En consecuencia, los resultados de este estudio serán importantes para el diseño de políticas ambientales que permitan reducir las emisiones del aire locales y/o globales al mínimo costo posible.

1.3. Estructura de la memoria de título

El primer apartado corresponde a la Introducción, donde se presenta la motivación, los objetivos y la justificación. La segunda parte corresponde a la revisión de literatura, en la cual se realiza una revisión de estudios anteriores relacionados con el tema. En el tercer apartado se explica la elaboración de la base de datos utilizada y el uso de un modelo de optimización. En el siguiente se dan a conocer los resultados con su respectivo análisis para finalmente, en el quinto apartado exponer las conclusiones del estudio.

2. REVISION DE LITERATURA

El material particulado fino (MP2,5) consiste en partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 μm , las cuales al ser inhaladas penetran fuertemente dentro de los pulmones y avanzan hacia el torrente sanguíneo (Pope et al., 2020). La exposición a altas concentraciones de MP2,5 constituye una amenaza para la salud y puede causar severos problemas, tales como cáncer de pulmón (Di et al., 2017; Xing et al., 2016), enfermedades cardiovasculares (Sawada et al., 2022; Franklin et al., 2015) y un incremento en la muerte prematura (Dedoussi et al., 2020; Lelieveld et al., 2015).

La contaminación por MP2,5 afecta a diversas zonas en el mundo, siendo más severa en países de ingreso bajo y medio (WHO, 2016). Por lo anterior, existen muchos estudios que describen esta problemática en diferentes países, tales como Pakistán (Asghar et al., 2022), países escandinavos (Kukkonen et al., 2019), Italia (Galantucci & Duong, 2021), Serbia (Nesterovic et al., 2021), China (Zhou et al., 2020), entre otros. En la zona centro-sur de Chile, la contaminación por MP2,5 está asociada principalmente a las emisiones por combustión de leña para calefacción residencial (Jorquera et al., 2018). Muchas ciudades de este país superan holgadamente los límites de concentraciones definidos en las normas de calidad del aire, incluso 13 de ellas aparecen en el ranking de las 15 ciudades más contaminadas de Sudamérica (IQ Air, 2021). Una forma de abordar esta situación ha sido la implementación de Planes de Descontaminación Atmosférica en las ciudades más afectadas, los cuales incluyen diferentes medidas regulatorias y recursos públicos para financiar el recambio de calefactores a leña y reacondicionamiento térmico de las viviendas (Mardones & Cornejo, 2020a).

2.1. Calefacción residencial en Chile

En Chile, hay muchas alternativas para la calefacción residencial, pero la elección de los hogares depende de la zona geográfica, características socioeconómicas y preferencias. Según el Ministerio de Energía (2018), el 80,4% de los hogares usa algún tipo de calefacción. Específicamente, el 97,3% utiliza una estufa o calefactor individual, 2,4% utiliza calefacción central y 0,3% ambas opciones. Respecto a los hogares que utilizan estufa o calefactor individual, el 67,7% tiene solo un calefactor, 24,4% tiene dos calefactores, 7,4% tiene tres o más calefactores y el resto no sabe o no responde. En el mercado existen diversos tipos de

tecnologías para los equipos individuales, incluyendo calefactores a leña, calefactor a pellet, calefactor a parafina, calefactor a gas licuado, calefactor a gas natural, oleoeléctrico, termoventilador, aire acondicionado portátil, aire acondicionado Split, aire acondicionado Split Inverter, salamandra, calefactor halógeno (infrarrojo), convector eléctrico, entre otros. Sin embargo, el combustible más usado es la leña (74%), seguido por el gas licuado (10%), gas natural (7%), parafina (5%), pellet (2%) y electricidad (2%) (Ministerio de Energía, 2020).

Los calefactores a biomasa (leña o pellet) emiten contaminantes directamente a la atmósfera a través de las tuberías de escape de gases. Sin embargo, los calefactores a leña tienen un factor de emisión teórico de $MP_{2,5}$ que crece con la humedad de la leña, mientras que los calefactores a pellet emiten menos por la homogeneidad y baja humedad del combustible (Ministerio de Energía, 2020). Los calefactores que utilizan combustibles derivados del petróleo generan contaminación intradomiciliaria y exterior. En esta categoría tenemos el calefactor a parafina, el calefactor a gas licuado y el calefactor a gas natural, ordenados de mayor a menor por factor de emisión (Ministerio del Medio Ambiente, 2019a). Por otra parte, los calefactores eléctricos y aire acondicionado no emiten contaminantes a la atmósfera de forma directa, las diferencias entre ellos radican en la potencia, consumo y capacidad de calefacción. Los calefactores eléctricos tienen una eficiencia cercana al 100%, mientras que el aire acondicionado puede variar entre 200% y 400% (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2016).

2.2. Aislación de las viviendas en Chile

En Chile, se creó la primera norma sobre regulación térmica en el año 2000, pero solamente establecía estándares para el aislamiento térmico de techos (Mardones, 2021a). En el año 2007 se implementó una norma que regulaba la aislación térmica de paredes, pisos y ventanas (Schueftan & González, 2015b). La norma anterior fue modificada en el año 2017 para establecer requerimientos térmicos más exigentes según zona geográfica, dividiéndose el país en siete zonas (Besser & Vogdt, 2017). El principal foco de la norma vigente es disminuir los requerimientos de calefacción, pero deja de lado factores como ventilación, infiltración de aire y riesgo de sobrecalentamiento (Flamant et al., 2022). No obstante, las viviendas construidas antes de la implementación de la norma de 2007 tienen severos problemas de

aislación térmica (Schueftan et al., 2016). También, existen otros problemas en las viviendas chilenas que afectan sus requerimientos de calefacción, tales como humedad, falta de ventilación, mala calidad de puertas y ventanas, mala instalación de puertas y ventanas, entre otros (Reyes et al., 2019). La falta de eficiencia térmica afecta especialmente a los hogares de bajos ingresos que viven en viviendas antiguas, las cuales necesitan de más energía para alcanzar temperaturas de confort (Reyes et al., 2019; Vergara et al., 2019). Lo anterior, se ha tratado de solucionar paulatinamente a través de subsidios para mejorar la calidad de las viviendas (Schueftan & González, 2015b). Sin embargo, los estándares de los hogares están muy lejos de ser construcciones eficientes y de bajo consumo energético (Besser & Vogdt, 2017).

2.3. Causas de la contaminación por MP_{2,5}

En Chile, la principal causa de contaminación por MP_{2,5} es la combustión de leña para calefacción, representando un 66% de las emisiones totales en el país (Ministerio del Medioambiente, 2019b). Este porcentaje es mayor a medida que se avanza desde el centro hacia el sur del país (Schueftan et al., 2016). Una forma aparentemente simple de reducir las emisiones de MP_{2,5} provenientes de la calefacción residencial es prohibir el uso de leña. Sin embargo, diferentes gobiernos han sido reticentes a esta alternativa por los serios problemas de pobreza energética¹ que enfrentan los hogares chilenos (Calvo et al., 2022). La pobreza energética de los hogares del centro-sur de Chile tiene tres características principales: 1) altos precios de los combustibles menos contaminantes (Reyes et al., 2015); 2) baja eficiencia energética de las viviendas (Healy & Clinch, 2004; Porras-Salazar et al., 2020); y 3) bajos ingresos de los hogares (Walker et al., 2014; Martínez-Soto et al., 2021). Un caso ejemplificador es la ciudad de Valdivia, en la cual el 61% de los hogares sufre de pobreza energética en el invierno y 25% en el verano (Reyes et al., 2019).

Por otro lado, la leña es parte de la cultura en la zona centro-sur del país por su gran disponibilidad y bajo precio en comparación con otros combustibles más limpios como el gas y electricidad (Schueftan & González, 2015a). Algunos estudios han propuesto que la leña debe mantenerse en la matriz energética ya que es carbono neutral, su precio mantiene

¹ Se dice que existe pobreza energética cuando se gasta más del 10% del ingreso en calefacción (Boardman, 1991).

bajos los niveles de pobreza energética y es una fuente de trabajo para las personas que participan en la cadena de suministro (Reyes et al., 2015; Sikkema et al., 2011; Lundmark & Mansikkasalo, 2009). Sin embargo, existen diversos aspectos regulatorios que ayudarían a disminuir las emisiones generadas por este combustible, tales como establecer un mercado formal de leña seca certificada y utilizar equipos más eficientes para la combustión (Reyes et al., 2015). Una alternativa a la leña es un biocombustible a base de biomasa llamado pellet (Barčić et al., 2020). Este combustible es quemado en estufas de pellet cuya eficiencia de combustión es mayor que en sistemas de calefacción a leña tradicionales (Quinteiro et al., 2019). Además, el pellet tiene una densidad energética mayor, por lo que se requiere una menor cantidad respecto a la leña para generar el mismo calor (Cespi et al., 2014).

Finalmente, las bajas temperaturas en la estación de otoño-invierno y la mala calidad térmica de las viviendas genera una gran demanda de energía para calefacción en el centro-sur de Chile, lo cual se traduce en mayor consumo de leña y emisiones (Schueftan & González, 2015a). Otras causas importantes de la contaminación por $MP_{2,5}$ son la existencia de calefactores a leña ineficientes que son utilizados con leña húmeda y la inexistencia de un mercado formal de leña seca (Ministerio de Energía, 2020). La instalación de artefactos de calefacción más eficientes y medidas de aislamiento térmico deberían generar beneficios significativos en términos de reducción de emisiones (Sawyer et al., 2022). Además, existen otras fuentes que aportan a la contaminación por $MP_{2,5}$ como transporte e industrias, pero su participación en el total de emisiones es baja (Ministerio del Medioambiente, 2019c). Por lo anterior, es importante concentrarse en el análisis de opciones costo-efectivas para reducir las emisiones de las fuentes residenciales (Mardones & Sanhueza, 2015).

2.4. Medidas para disminuir la contaminación por $MP_{2,5}$

En las ciudades del centro-sur de Chile se han implementado diversas medidas para disminuir la contaminación por $MP_{2,5}$. Los Planes de Descontaminación Atmosférica se establecen en zonas o ciudades en las cuales se han superado las normas de calidad del aire. Estos planes incluyen diferentes medidas para reducir las concentraciones, entre las cuales se destacan los subsidios para recambio de calefactores y mejoramiento térmico de viviendas (Mardones & Cornejo, 2020b).

Desde un punto de vista teórico, la adopción de calefactores más eficientes y el mejoramiento térmico de viviendas debería contribuir a la reducción de emisiones (Abu Qadourah et al., 2022; Ward et al., 2009; Li et al., 2011). Sin embargo, a medida que se han puesto en marcha las medidas de reacondicionamiento de viviendas y recambio de calefactores en Chile se han ido determinando sus impactos en condiciones reales a través de técnicas de evaluación expost. Por ejemplo, Mardones (2021b) determina que el recambio de calefactores a leña por calefactores a pellet y kerosene de tiro forzado reducen significativamente las emisiones de $MP_{2,5}$, mientras que la adopción de estufas a leña certificadas no contribuye a la reducción de emisiones. Por otro lado, Mardones (2021a) concluye que los hogares beneficiados por el programa de reacondicionamiento térmico mejoran significativamente su nivel de confort térmico, pero que no reducen el consumo de leña y emisiones debido a los altos niveles de pobreza energética preexistentes. Un caso similar ocurrió en Corea del Sur, en el cual un plan de mejoramiento térmico de viviendas llevó a un aumento de las emisiones (Ji et al., 2022). Una explicación para este tipo de situaciones es el efecto rebote, el cual es más frecuente en los hogares de bajos ingresos (Freire, 2016; Seebauer, 2018).

2.5. Modelos de optimización calibrados con microdatos a nivel de hogar

Existen algunos estudios que utilizan modelos de optimización calibrados con datos a nivel de hogar para simular opciones que permitan reducir emisiones de $MP_{2,5}$. Mardones & Sanhueza (2015) simulan un sistema de transacción de emisiones que incluye fuentes industriales y residenciales. En este estudio las fuentes industriales tienen la opción de instalar tecnologías de abatimiento y las fuentes residenciales pueden sustituir sus calefactores a leña por otros calefactores menos contaminantes, los resultados muestran que se pueden alcanzar metas totales de reducción a bajo costo si se permite que las fuentes industriales compensen sus emisiones a través del recambio de calefactores. Mardones & Saavedra (2016) adaptan el modelo anterior para comparar los costos regulatorios totales de un sistema de transacción de emisiones respecto a un sistema de permisos ambientales en el cual se transan concentraciones de $MP_{2,5}$. Los resultados muestran que ambos instrumentos económicos tienen desempeños similares para objetivos de reducción menores a 80%, lo cual se explica porque el principal responsable de las emisiones es el sector residencial y el recambio de calefactores es costo-efectivo. Finalmente, Mardones (2019) utiliza un modelo

de optimización para simular el nivel óptimo de contaminación generado por fuentes residenciales e industriales. En este estudio se determina el nivel de contaminación que maximiza los beneficios netos para la sociedad. Cabe señalar que los beneficios netos corresponden a los beneficios en salud por reducir la concentración de contaminantes menos los costos por reducir las emisiones de fuentes industriales y residenciales. Todos los estudios mencionados previamente requieren datos a nivel de hogar sobre consumo de leña, poder calorífico de la leña, poder calorífico de combustibles sustitutos, superficie a calefaccionar, eficiencia térmica del calefactor actual, eficiencia térmica del calefactor alternativo, precio de los combustibles, entre otros.

3. METODOLOGIA

En este capítulo se describe la metodología usada para esta investigación. Primero, se presenta la base de datos que contiene información referente al uso de calefacción a leña y características socioeconómicas de los hogares analizados. Luego, se explica cómo se determina la tecnología de calefacción actual en los hogares y las opciones existentes en el mercado para reducir el uso de leña y emisiones de MP_{2,5}. A continuación, se presentan los cálculos para estimar las emisiones de contaminantes y costos, en la situación base y escogiendo otra alternativa de calefacción. Posteriormente, se plantea un modelo de optimización que simula el comportamiento de los hogares bajo distintas metas de reducción de emisiones. Finalmente, se exponen los escenarios regulatorios simulados con el modelo.

3.1. Encuesta para la caracterización de hogares

En este estudio se utilizan datos de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) del año 2013 para simular escenarios de reducción costo-efectiva de emisiones de MP_{2,5} en la zona centro-sur de Chile. La simulación se basa en un modelo de optimización calibrado con microdatos que busca minimizar los costos de cumplir una determinada meta ambiental, considerando opciones de recambio de calefactores y aislamiento térmico. Se elige la encuesta CASEN del año 2013 ya que esta fue la última vez que se levantó información sobre el consumo residencial de leña. Cabe señalar que el consumo anual de este combustible es requerido para estimar el gasto en calefacción y emisiones de cada hogar en el escenario base y escenarios contrafactuales.

Esta encuesta posee información referente a 66.725 hogares, los cuales representan 5.250.773 hogares chilenos. Lo anterior, se explica porque cada hogar encuestado tiene un factor de expansión que representa la cantidad de hogares que poseen características similares. En este estudio se incluyen solamente los hogares que afirmaron utilizar leña para calefacción o cocción de alimentos en la encuesta ya que este combustible es la principal causa de contaminación por MP_{2,5} en la zona centro-sur de Chile. Además, se excluyen los hogares de comunas que no tienen implementado un Plan de Descontaminación Ambiental (PDA). Así, el número de observaciones se reduce a 11.480 hogares en las comunas con PDA vigente que representan a 672.476 hogares chilenos localizados entre las regiones de O'Higgins y Aysén. En la Tabla 3.1 se presenta la cantidad de hogares incluidos en el estudio según PDA.

Tabla 3.1: Cantidad de hogares incluidos en el estudio según PDA

PDA	Región	Cantidad de hogares encuestados	Cantidad de hogares representados
Valle Central de la Región de O'Higgins	O'Higgins	1.932	109.699
Talca y Maule	Maule	337	36.587
Valle Central de la Provincia de Curicó	Maule	960	56.874
Chillán y Chillán Viejo	Biobío	643	43.635
Los Ángeles	Biobío	601	46.559
Concepción Metropolitano	Biobío	2.284	170.419
Temuco y Padre las Casas	Araucanía	1.496	88.061
Valdivia	Los Lagos	1.403	44.659
Osorno	Los Lagos	739	57.005
Coyhaique y su zona circundante	Aysén	1.085	18.978

Fuente: Elaboración propia en base a CASEN 2013.

3.2. Opciones de calefacción residencial

En Chile existen diversos tipos de calefactores a leña, los cuales se pueden clasificar en: calefactores a leña con templador; calefactores a leña sin templador; calefactores a leña certificados; cocinas a leña; salamandras; chimeneas; otros. Sin embargo, la encuesta CASEN no reporta información relativa al tipo de calefactor que utiliza cada hogar. Por lo anterior, se aplica un método que asigna aleatoriamente uno de los tipos de calefactores a leña previamente mencionados a cada hogar, manteniendo la participación de calefactores a leña en hogares chilenos estimada por SICAM (2017) (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Participación de calefactores a leña en hogares chilenos

Tipo de calefactor a leña	Participación
Calefactor a leña con templador	51,9%
Calefactor a leña sin templador	17,4%
Calefactor a leña certificado	7,8%
Cocina a leña	19,1%
Salamandra	2,6%
Chimenea y otros	1,2%

Fuente: SICAM (2017).

Los hogares que utilizan actualmente un calefactor a leña pueden disminuir sus emisiones al reemplazarlo por una opción de calefacción más eficiente y menos contaminante. Las opciones de recambio de calefactores consideradas en este estudio se enfocan en combustibles distintos a la leña, tales como parafina, gas licuado, electricidad y pellet. En el caso de la parafina, se incluyen siete calefactores de tres marcas diferentes (Toyotomi, Fensa y Corona) disponibles en el mercado chileno, donde cinco son calefactores convencionales y dos son calefactores de tiro forzado. Las potencias de estos calefactores a parafina varían entre 2,3 kW y 6,6 kW, que a su vez permiten calefaccionar superficies entre los 16,5 m² y los 150 m². También, se incluyen siete calefactores a gas licuado de cuatro marcas diferentes (Mademsa, Toyotomi, Sumoheat y Sindelen), donde cinco son calefactores convencionales y dos son calefactores de tiro forzado. Estos calefactores a gas licuado pueden usar cilindros de 5 kg, 11 kg o 15 kg y sus potencias se encuentran en un intervalo entre 2,8 kW y 5,0 kW. Las superficies de calefacción varían entre 16 m² y 100 m². En cuanto a la electricidad, se incluyen nueve opciones de ocho marcas diferentes (Recco, Sindelen, Atlantic, Airolite, Toyotomi, Samsung, Midea y Anwo), cinco calefactores eléctricos convencionales y cuatro equipos de aire acondicionado. Las potencias fluctúan entre 1,0 kW y 3,5 kW, y permiten calefaccionar superficies entre 14 m² y 50 m². Además, se incluyen cinco estufas a pellet de tres marcas diferentes (Amesti, Bosca y Yunque). Las superficies de calefacción rondan los 150 m², mientras que las potencias se encuentran en un rango entre 6 kW y 9 kW. Cabe señalar que para cada tipo de combustible se incluyen calefactores con potencias y superficies de calefacción heterogéneas para no realizar un análisis de costo-efectividad redundante. Una última alternativa incluida en el estudio es mantener el calefactor a leña actual y realizar un mejoramiento térmico de la vivienda para disminuir las pérdidas de calor, lo cual reduciría el consumo de leña y emisiones. Esta opción consiste en mejorar las condiciones de muros, techumbre y piso ventilado de la vivienda y ha sido impulsada por subsidios del gobierno (Mardones, 2021a). El detalle de todas las alternativas consideradas se presenta en la Tabla 3.3. Además, en la Tabla 7.12 del Anexo es posible encontrar una imagen referencial de cada calefactor, acompañado del enlace del cual fue obtenido.

Tabla 3.3: Opciones de calefacción incluidas en el estudio

Marca	Modelo	Tipo de combustible	Poder calorífico (kcal/h)	Superficie de calefacción (m ²)	Consumo energético
Toyotomi	KS-23	Parafina	1.983	50	0,219 l/h
Toyotomi	LC-43 DGM	Parafina	3.600	100	0,406 l/h
Fensa	F720+	Parafina	2.321	16,5	0,24 l/h
Toyotomi	LC-29	Parafina	2.610	60	0,295 l/h
Corona	Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco	Parafina	5.796	150	0,64 l/h
Toyotomi	Tiro Forzado 3 kW FF-V30	Parafina	2.579	60	0,34 l/h
Toyotomi	Tiro Forzado 5,5 kW FF-55	Parafina	4.729	120	0,62 l/h
Mademsa	Estufa a gas 15 kg VITTALE 40	Gas Licuado	3.440	16	0,29 kg/h
Toyotomi	Estufa a gas 5 kg GH-30 BLUE	Gas Licuado	2.394	40	0,205 kg/h
Sumoheat	Estufa a Gas Sumoheat FH-4200 Blue Flame 15 Kg	Gas Licuado	3.011	100	0,148 kg/h
Toyotomi	Estufa a gas Blue Flame con ventilador	Gas Licuado	3.181	50	0,27 kg/h
Sindelen	Estufa a gas/eléctrica 11 kilos híbrida	Gas Licuado	4.190	65	0,3 kg/h
Toyotomi	Tiro Forzado 3 kW Gas Licuado TF-GH30	Gas Licuado	2.580	50	0,195 kg/h
Toyotomi	Tiro Forzado 5 kW Gas Licuado TF-GH50	Gas Licuado	4.041	100	0,368 kg/h
Recco	PTC 1.500 W	Electricidad	1.289	15	1,5 kWh
Sindelen	Convector EEC-1550	Electricidad	1.289	40	1,5 kWh
Atlantic	Calefactor eléctrico 1.000 W 51x65 cm	Electricidad	895	25	1 kWh
Airolite	Convector digital 1500 W wifi	Electricidad	1.289	20	1,5 kWh
Toyotomi	Termoventilador eléctrico 1.800 W	Electricidad	1.719	25	2 kWh
Samsung	Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr	Electricidad	2.751	15	3,2 kWh
Samsung	Split Inverter Muro Wifi 12000 BTU/hr	Electricidad	3.026	15	3,52 kWh
Midea	Aire Acondicionado Split Inverter Extreme Midea 9.000 BTU	Electricidad	2.269	15	2,6 kWh
Anwo	Aire acondicionado Split Muro 24000 BTU ANWO-N ECO. Clase A. GES24ECO-N	Electricidad	6.425	51	2,1 kWh
Amesti	Italy 8100 Plus Rojo Italiano	Pellet	7.738	168	2,1 kg/h
Bosca	Eco Smart Touch Plus Burdeo	Pellet	7.566	145	1 kg/h
Bosca	Mila 6 Charcoal	Pellet	5.162	100	1,1 kg/h
Amesti	Italy 6100	Pellet	5.159	118	1,4 kg/h
Yunque	Roma	Pellet	5.674	100	1,34 kg/h
Acondicionamiento térmico	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de los equipos.

3.3. Estimación del consumo energético equivalente

El análisis para simular opciones de calefacción bajo diferentes metas de reducción de emisiones asume que el consumo energético anual de los hogares permanece constante, excepto para el acondicionamiento térmico ya que en este caso se conoce la reducción en el consumo y el efecto rebote (Mardones, 2021a). En consecuencia, el consumo de combustible para cualquier nuevo calefactor debe ser energéticamente equivalente al consumo actual de leña (kg/año) en cada hogar. Esta conversión energética requiere conocer el poder calorífico y la eficiencia del calefactor en la situación base y en el escenario contrafactual. La ecuación (1) expresa el consumo energético equivalente de la alternativa i en el hogar h :

$$Ceq_{h,i} = (1 - b_i) \times \frac{C_h \times PC_{i'} \times Ef_{i'}}{PC_i \times Ef_i} + b_i \times (1 - T) \times C_h \quad (1)$$

En donde, el parámetro binario b_i adopta el valor cero para un nuevo calefactor ($b_i = 0$) o uno para el acondicionamiento térmico ($b_i = 1$). En el caso de un nuevo calefactor, el consumo equivalente del calefactor i en el hogar h ($Ceq_{h,i}$) se obtiene al multiplicar el consumo de leña en el hogar h (C_h) por el poder calorífico ($PC_{i'}$) y la eficiencia ($Ef_{i'}$) del calefactor a leña actual tipo i' , y luego, al dividir este valor por el poder calorífico (PC_i) y la eficiencia (Ef_i) de la opción de calefacción i . Cuando el nuevo calefactor usa electricidad, se asume que un 1 kg de leña es equivalente a 4.324 kcal/kg (CDT, 2012) lo que permite calcular el consumo de leña en kWh, valor que se convierte en el consumo equivalente del calefactor eléctrico o aire acondicionado. En el caso del acondicionamiento térmico, el nuevo consumo de leña en el hogar h es igual al consumo en la situación base (C_h) por uno menos la reducción porcentual en el consumo de leña (T) después de realizar un mejoramiento térmico en el hogar que fue determinado por Mardones (2021a) a través de una evaluación ex-post para un programa de mejoramiento térmico de viviendas en el sur de Chile.

En la Tabla 3.4 se reporta el poder calorífico y eficiencia térmica de los calefactores analizados en este estudio.

Tabla 3.4: Eficiencia térmica de los calefactores

Calefactor	Eficiencia térmica	Poder calorífico (kcal/h)
Calefactor a leña con templador	60%	9.028
Calefactor a leña sin templador	55%	7.480
Calefactor a leña certificado	68%	6.190
Cocina a leña	55%	7.824
Salamandra	50%	7.480
Chimenea y otros	25%	14.961
Calefactor a parafina	84%	1.983 – 5.796
Calefactor a pellet	87%	5.159 – 7.738
Calefactor eléctrico	100%	895 – 1.719
Aire acondicionado Split Inverter	300%	2.269 – 6.425
Calefactor a gas licuado	88%	2.394 – 4.190

Fuente: CDT (2012) y Mardones (2021b).

3.4. Estimación de emisiones de MP_{2,5}

Todos los calefactores que usan combustibles fósiles o biomasa emiten MP_{2,5} de forma directa. En contraste, los calefactores que usan electricidad no generan emisiones directas, pero existen emisiones indirectas liberadas al producir la electricidad. La cantidad anual de toneladas de MP_{2,5} emitidas por cada hogar h cuando utiliza el calefactor a leña tipo i' en la situación base ($EMP25_{h,i'}$) se puede estimar a través de la ecuación (2):

$$EMP25_{h,i'} = \frac{C_h \times (FELS_{i'} \times LS + FELSH_{i'} \times LSH + FELH_{i'} \times LH)}{10E^{+06}} \quad (2)$$

En donde, C_h representa el consumo de leña (kg/año) del hogar h , $FELS_{i'}$ el factor de emisión de MP_{2,5} del calefactor a leña tipo i' para leña seca, LS la proporción de leña seca utilizada para calefacción, $FELSH_{i'}$ el factor de emisión de MP_{2,5} del calefactor a leña tipo i' para leña semihúmeda, LSH la proporción de leña semihúmeda utilizada para calefacción, $FELH_{i'}$ el factor de emisión de MP_{2,5} del calefactor a leña tipo i' para leña húmeda, y LH la proporción de leña húmeda utilizada para calefacción.

Por otro lado, la cantidad de MP_{2,5} emitida (ton/año) por cada hogar ($EMP25_{h,i}$) después de sustituir su calefactor a leña tipo i' por un nuevo calefactor i se puede estimar a través de la ecuación (3):

$$EMP25_{h,i} = \frac{Ceq_{h,i} \times FE_i}{10E^{+06}} \quad (3)$$

En donde, $Ceq_{h,i}$ representa el consumo equivalente de la opción de calefacción i en el hogar h dado el consumo original de leña y FE_i es el factor de emisión de $MP_{2,5}$ para la opción de calefacción i .

Es importante notar que las emisiones dependen fuertemente de los factores de emisión asociados al tipo de calefactor y combustible utilizado. En el caso de los calefactores a leña, los factores de emisión también varían según los niveles de humedad de este combustible. Un informe de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT, 2015) analizó los niveles de humedad de la leña utilizada para calefacción residencial en el centro-sur de Chile, concluyendo que 27% es seca (< 20% de humedad), 43% es semihúmeda (20%-30% de humedad) y 30% es húmeda (>30% humedad). Estos mismos porcentajes fueron asumidos en este estudio para determinar los consumos de leña seca, semihúmeda y húmeda en cada hogar. En la Tabla 3.2 se presentan los factores de emisión para calefactores a leña (RETC, 2017) y calefactores que funcionan con otros combustibles (Mardones, 2021b). En el caso de los calefactores convencionales o equipos de aire acondicionado que usan electricidad se estimó un factor de emisión específico para Chile a partir del total de la energía eléctrica generada en el año 2018² y las emisiones totales de $MP_{2,5}$ liberadas por el sector eléctrico ese mismo año³. Finalmente, la reducción de emisiones por reacondicionar térmicamente un hogar proviene de una evaluación ex-post realizada a un programa de mejoramiento térmico aplicado en viviendas del sur de Chile (Mardones, 2021a), el cual determina una reducción promedio de solamente 4,32% ya que demuestra la existencia de un fuerte efecto rebote.

² <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/generacion-de-energia-electrica/>

³ <http://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisiones-al-aire-de-fuente-puntuales>

Tabla 3.5: Factores de emisión de MP_{2,5} según calefactor

Calefactores	Factor de emisión		
Calefactor a leña con templador	8,1 (g/kg de leña seca)	13,1 (g/kg de leña semihúmeda)	38,2 (g/kg de leña húmeda)
Calefactor a leña sin templador	14,9 (g/kg de leña seca)	24,0 (g/kg de leña semihúmeda)	69,9 (g/kg de leña húmeda)
Calefactor a leña certificado	2,4 (g/kg de leña seca)	10,7 (g/kg de leña semihúmeda)	10,7 (g/kg de leña húmeda)
Cocina a leña	18,6 (g/kg de leña seca)	30,1 (g/kg de leña semihúmeda)	87,6 (g/kg de leña húmeda)
Salamandra	16,1 (g/kg de leña seca)	26,0 (g/kg de leña semihúmeda)	75,8 (g/kg de leña húmeda)
Chimenea y otros	16,1 (g/kg de leña seca)	26,0 (g/kg de leña semihúmeda)	75,8 (g/kg de leña húmeda)
Parafina		0,0000336 (g/l)	
Pellet		1,8 (g/kg)	
Electricidad		0,000000034 (g/kWh)	
Gas licuado		0,000091968 (g/kg)	

Fuente: RETC (2018) y Mardones (2021b).

3.5. Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero

Los calefactores pueden emitir gases de efecto invernadero globales como dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrógeno (N₂O) y metano (CH₄), y también, contaminantes de efecto invernadero locales (carbono negro). En el caso específico de los calefactores a leña y pellet, se asume que la emisión de CO₂ es cero ya que el árbol del cual se obtuvo el combustible captó esas emisiones en el pasado, mientras que las emisiones de N₂O y CH₄ de la leña y pellet sí se cuantifican. Por otro lado, los diferentes gases de efecto invernadero globales emitidos por cada calefactor se pueden medir en toneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq) a través del Potencial de Calentamiento Global (GWP) de cada contaminante.

La ecuación para estimar las emisiones de CO₂eq anuales para cada hogar h que usa el calefactor a leña tipo i' en la situación base ($ECO_{2eqh,i'}$) se detalla en la ecuación (4):

$$ECO_{2eqh,i'} = \sum_p C_h \times FE_{p,i'} \times GWP_p \quad (4)$$

En donde, C_h es el consumo de leña del hogar h en la situación base, $FE_{p,i'}$ es el factor de emisión del gas de efecto invernadero global p (CO₂, N₂O ó CH₄) para el combustible usado

por el calefactor a leña tipo i' y GWP_p es el potencial de calentamiento global de cada contaminante p .

La ecuación para estimar las emisiones de CO₂ equivalente para cada hogar h después de sustituir su calefactor a leña tipo i' por un nuevo calefactor i ($ECO2eq_{h,i}$) se detalla en la ecuación (5):

$$ECO2eq_{h,i} = \sum_p Ceq_{h,i} \times FE_{p,i} \times GWP_p \quad (5)$$

En donde, $Ceq_{h,i}$ es el consumo equivalente de la opción de calefacción i en el hogar h , $FE_{p,i}$ es el factor de emisión del contaminante p para el combustible usado por el calefactor i y GWP_p es el potencial de calentamiento global para cada contaminante p .

Los factores de emisión y los valores del GWP para cada gas de efecto invernadero y combustible se presentan en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Factores de emisión según combustible y valor del GWP

Combustible	Factor de emisión CO ₂	Factor de emisión de CH ₄	Factor de emisión de N ₂ O
Leña	0	0,0000047 (ton CH ₄ /kg)	0,0000000113 (ton N ₂ O/MJ)
Pellet	0	0,00000001 (ton CH ₄ /MJ)	0,000000032 (ton N ₂ O /kg)
GLP	0,002984 (ton CO ₂ /kg)	0,00000024 (ton CH ₄ /kg)	0,0000000021 (ton N ₂ O /MJ)
Parafina	0,003149 (ton CO ₂ /l)	0,00000043 (ton CH ₄ /l)	0,0000000016 (ton N ₂ O /MJ)
Electricidad	0,000378 (ton CO ₂ /kWh)	0,00000005 (ton CH ₄ /kWh)	0,00000000816 (ton N ₂ O /kWh)
GWP ⁴	1	29,8	273

Fuente: Greenhouse Gas Protocol (2017), Ozgen & Caserini (2018), IPCC (2006), EPA (2014), Seljeskog et al. (2017) e IPCC (2021).

Algunos factores de emisión presentados se encuentran expresados en ton/MJ. Así que para usar estos valores es necesario convertir el consumo equivalente en unidades de masa a unidades de energía. Para lo anterior, se utilizan los valores de la densidad energética que en

⁴ Los valores GWP consideran un horizonte de 100 años.

el caso de la leña es 18 MJ/kg (CDT, 2012), pellet 17,4 MJ/kg (Telmo & Lousada, 2011), GLP 46,1 MJ/kg (Reyes et al., 2015) y parafina 44,5 MJ/kg (Reyes et al., 2015).

Por otro lado, todos los calefactores emiten directa o indirectamente carbono negro que es un contaminante de efecto invernadero local. Este contaminante es una partícula sólida en suspensión que afecta al cambio climático ya que es capaz de absorber la radiación solar (Huneeus et al., 2020). La ecuación que permite estimar las emisiones de carbono negro para cada hogar h que usa el calefactor a leña tipo i' en la situación base ($ECN_{h,i'}$) se detalla en la ecuación (6):

$$ECN_{h,i'} = R_{i'} \times EMP25_{h,i'} \quad (6)$$

En donde, $R_{i'}$ es el porcentaje de las emisiones de $MP_{2,5}$ que corresponden a carbono negro para el combustible usado por el calefactor a leña tipo i' y $EMP25_{h,i'}$ es la emisión anual de $MP_{2,5}$ para cada hogar h que usa el calefactor a leña tipo i' en el escenario base.

La ecuación para estimar las emisiones de carbono negro para cada hogar h después de sustituir su calefactor a leña tipo i' por un nuevo calefactor i ($ECN_{h,i}$) se detalla en la ecuación (7):

$$ECN_{h,i} = R_i \times EMP25_{h,i} \quad (7)$$

En donde, R_i es el porcentaje de las emisiones de $MP_{2,5}$ que corresponden a carbono negro para el combustible usado por el nuevo calefactor i y $EMP25_{h,i}$ es la emisión anual de $MP_{2,5}$ para cada hogar h que usa el nuevo calefactor i .

Los porcentajes de las emisiones de $MP_{2,5}$ que corresponden a carbono negro para cada combustible se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Razón entre carbono negro y material particulado fino

Combustible	Razón BC/MP _{2,5}
Pellet	5,6%
Leña (calefactor)	5,6%
Leña (cocina)	13,8%
Parafina	10,0%
GLP	10,0%
Electricidad	2,1%

Fuente: Environment and Climate Change Canada (2016).

En el caso del acondicionamiento térmico se estiman las emisiones de CO₂eq y carbono negro considerando que esta opción genera una reducción del consumo de leña de 4,32% (Mardones, 2021a).

3.6. Estimación de los costos para las opciones de calefacción residencial

Los calefactores a leña poseen un poder calorífico alto en comparación con algunas opciones de calefactores que usan otros combustibles. Por lo anterior, se podría requerir más de un calefactor por hogar para mantener el consumo energético actual. El número de calefactores i requeridos para sustituir el calefactor a leña tipo i' se puede obtener asumiendo que prácticamente todos los calefactores nuevos serán utilizados 8 horas al día entre marzo y octubre ya que estos meses tienen las temperaturas más bajas en la zona centro-sur de Chile. Lo anterior, no aplica para las estufas a pellet, Aire acondicionado Split Muro 24000 BTU ANWO-N ECO Clase A GES24ECO-N ya que para estos calefactores la razón de sustitución es uno es uno entre el nuevo calefactor y el calefactor a leña actual. En el caso del acondicionamiento térmico se asume que se mantiene el calefactor a leña usado en la situación base. Lo anterior, bajo el supuesto que se puede escoger una única opción de calefacción en cada hogar. La ecuación (8) presenta el cálculo del número de calefactores i necesarios para calefaccionar el hogar h ($n_{h,i}$):

$$n_{h,i} = \frac{C_h \times PC_{i'} \times Ef_{i'}}{PC_i \times Ef_i} \times \frac{1}{H_i \times Ut_{horas} \times Ut_{dias}} \quad (8)$$

En donde, C_h representa el consumo de leña del hogar h en la situación base, $PC_{i'}$ es el poder calorífico del calefactor a leña tipo i' en la situación base, $Ef_{i'}$ es la eficiencia del calefactor a leña tipo i' , PC_i es el poder calorífico del nuevo calefactor i , Ef_i es la eficiencia del calefactor i , H_i es el consumo por hora del calefactor i , Ut_{horas} es el uso de calefacción en horas por día y Ut_{dias} es el uso de calefacción en días por año. Cabe señalar que el número de calefactores no puede ser decimal, por lo cual el resultado se aproxima al entero mayor.

El costo de sustituir el calefactor a leña tipo i' usado en la situación base por la nueva opción de calefacción i ($ch_{h,i}$) se puede obtener a través de la ecuación (9):

$$ch_{h,i} = (1 - b_i) \times [n_{h,i} \times CAE_i + Ceq_{h,i} \times P_{r,i} - C_h \times P_{r,i'} + a_h \times Ccogas] + b_i \times [CAE_i + (Ceq_{h,i} \times P_{r,i}) - (C_h \times P_{r,i'})] \quad (9)$$

En donde, el parámetro binario b_i calcula el costo de calefacción de la opción i , adoptando el valor cero para un nuevo calefactor ($b_i = 0$) o uno para el acondicionamiento térmico ($b_i = 1$). En el caso de un nuevo calefactor, $n_{h,i}$ es el número de calefactores i necesarios para calefaccionar el hogar h . CAE_i es el costo anual equivalente de la opción de calefacción i , en el cual se consideran los costos de inversión y mantención de la opción i y una tasa de descuento social del 6% (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2022). $Ceq_{h,i}$ es el consumo equivalente de la opción de calefacción i en el hogar h , $P_{r,i}$ es el precio en la región r del combustible utilizado por la opción de calefacción i , C_h es el consumo de leña en el hogar h en la situación base y $P_{r,i'}$ es el precio en la región r del combustible utilizado por el calefactor a leña tipo i' . Además, los hogares que tienen una cocina a leña y la reemplazan por un nuevo calefactor también necesitan comprar una cocina a gas y el gas requerido para su funcionamiento. El costo total anualizado de la cocina a gas es $Ccogas$, la cual se multiplica por el parámetro a_h que adopta el valor uno si el hogar h posee actualmente una cocina a leña y cero en otro caso. En el caso del acondicionamiento térmico, CAE_i es el costo anualizado del acondicionamiento térmico, $Ceq_{h,i}$ es el consumo equivalente de leña que se reduce respecto a la situación base por la implementación del acondicionamiento térmico, $P_{r,i'}$ es el precio de la leña en la región r y C_h es el consumo de leña del hogar h en la situación base.

Cabe señalar que en la formulación del modelo se utiliza el cambio en el costo respecto a la situación base. En consecuencia, el costo de mantener el calefactor a leña tipo i' es cero ya que el costo anual en leña de esta opción es el mismo que en el escenario base, tal como se aprecia en la ecuación (10).

$$ch_{h,i'} = Ceq_{h,i'} \times P_{r,i'} - C_h \times P_{r,i'} = 0 \quad (10)$$

Finalmente, los precios de los diferentes combustibles en las regiones del centro-sur de Chile se reportan en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8: Precios de combustibles según región del PDA

Combustible	Unidad de compra	Región de O'Higgins	Región del Maule	Región de Biobío y Región de Ñuble	Región de la Araucanía	Región de Los Lagos y Región de Los Ríos	Región de Aysén
GLP (\$/kg)	5 kg	2.290	2.360	2.150	2.160	2.190	2.190
	11 kg	1.873	1.945	1.732	1.882	1.927	1.818
	15kg	1.693	1.593	1.507	1.707	1.760	1717
Parafina (\$/l)		1.003	1.009	1.006	1.021	1.052	1.025
Pellet (\$/kg)		266	233	238	233	246	238
Electricidad (\$/kWh)	Tarifa normal	147	143	147	156	141	125
	Cargo adicional	165	178	166	184	171	189
Leña (\$/kg)		152	180	173	168	168	138

Fuente: Gas en línea⁵, Parafina en línea⁶, CGE⁷, SAESA⁸, EDELAYSSEN⁹ y SERNAC.

3.7. Modelo de optimización

El modelo de optimización tiene como objetivo minimizar el costo anualizado de las diferentes opciones de calefacción en cada hogar sujeto a una meta agregada de reducción de emisiones de MP_{2,5}. Las opciones incluidas en el modelo consideran el reemplazo del

⁵ https://www.gasenlinea.gob.cl/index.php/web/buscador?rere_id=0

⁶ <http://www.parafinaenlinea.cl/>

⁷ <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2022/01/Tarifas-Suministro-CGE-Enero-2022.pdf>

⁸ <https://www.gruposaesa.cl/saesa/tarifas-vigentes/>

⁹ <https://www.gruposaesa.cl/edelaysen/tarifas-vigentes/>

calefactor a leña actual por calefactores más eficientes que utilizan otros combustibles menos contaminantes, el reacondicionamiento térmico de los hogares manteniendo el calefactor a leña actual, o simplemente la mantención del calefactor a leña actual. Las opciones de recambio de calefactor y reacondicionamiento térmico reducen el consumo de leña y las emisiones de MP_{2,5}. Además, se asume que independiente de la opción escogida cada hogar mantiene su consumo energético actual, excepto en el caso del acondicionamiento térmico. Finalmente, es importante aclarar que este modelo se calibra con microdatos a nivel de hogar para cada una de las zonas del centro-sur del país con PDA vigente de forma completamente independiente ya que la meta de reducción de emisiones es para un contaminante del aire local.

El modelo tiene diferentes conjuntos de datos representados por índices, los cuales se describen a continuación:

i: Representa las diferentes opciones de calefacción *i* que puede elegir un hogar, incluyendo siete calefactores a parafina (cinco convencionales y dos de tiro forzado), siete calefactores a gas licuado propano (cinco convencionales y dos de tiro forzado), cinco calefactores eléctricos convencionales, cuatro equipos de aire acondicionado, cuatro calefactores a pellet, acondicionamiento térmico manteniendo el calefactor a leña actual, y también, la opción ninguno que mantiene el calefactor a leña tipo *i'* usado en la situación base (calefactor a leña con templador, calefactor a leña sin templador, calefactor a leña certificado, cocina a leña, salamandra y chimenea u otros).

h: Representa todos los hogares localizados en una misma zona con PDA vigente.

La función objetivo del modelo son los costos anualizados incrementales¹⁰ de las diferentes opciones de calefacción para todos los hogares que pertenecen a un mismo PDA.

$$Z = \text{MIN} \sum_h \sum_i ch_{h,i} \times u_{h,i} \times \text{Exp}_h \quad (11)$$

¹⁰ Cabe recordar que $ch_{h,i}$ es el costo anualizado de escoger la opción de calefacción *i* menos el costo anualizado de seguir usando el calefactor actual a leña tipo *i'* (ver ecuación (9)).

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_i u_{h,i} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_h \sum_i EMP25_h \times (1 - Erec_{h,i}) \times u_{h,i} \times Fexp_h = (1 - Meta) \times \sum_h EMP25_h \times Fexp_h \quad (13)$$

La restricción representada en la ecuación (12) establece que el hogar h puede escoger solamente una opción de calefacción i . La restricción representada en la ecuación (13) establece que la suma de las emisiones finales de todos los hogares debe ser igual a las emisiones totales iniciales por la meta porcentual de reducción ($Meta$). Las emisiones totales iniciales se calculan sumando las emisiones iniciales de cada hogar h en la situación base ($EMP25_h \equiv EMP25_{h,i'}$) (ver ecuación (2)) multiplicadas por su respectivo factor de expansión $Fexp_h$. Las emisiones finales de cada hogar dependen de las emisiones iniciales $EMP25_h$, la reducción porcentual de emisiones de MP_{2,5} de la opción i en el hogar h respecto a las emisiones del calefactor a leña tipo i' usado en la situación base ($Erec_{h,i} \equiv \frac{EMP25_{h,i}}{EMP25_{h,i'}} - 1$), una variable binaria $u_{h,i}$ que representa la opción escogida por el hogar h , y el factor de expansión $Fexp_h$. En la práctica, toda esta formulación representada por las ecuaciones (11), (12) y (13) simula un sistema de transacción de emisiones entre hogares que arroja una solución costo-efectiva para alcanzar una meta de reducción.

El recambio de calefactores o reacondicionamiento térmico no solamente reduce las emisiones de MP_{2,5}, sino que también tiene efecto en las emisiones de efecto invernadero globales y locales. En consecuencia, se incluyen ecuaciones auxiliares en el modelo que permiten determinar el cambio en las emisiones totales de CO₂eq y carbono negro cuando se cumple la meta de emisión de MP_{2,5}.

$$\Delta CO_2eq = \sum_h \sum_i ECO_2eq_h \times (1 - ErecCO_2eq_{h,i}) \times u_{h,i} \times Fexp_h \quad (14)$$

La ecuación (14) establece que la variación en las emisiones totales de CO₂eq (ΔCO_2eq) se obtiene al multiplicar las emisiones iniciales de cada hogar ($ECO_2eq_h \equiv ECO_2eq_{h,i'}$), uno menos la reducción porcentual de emisiones de la opción de calefacción i en el hogar h ($ErecCO_2eq_{h,i} \equiv \frac{ECO_2eq_{h,i}}{ECO_2eq_{h,i'}} - 1$), la variable binaria $u_{h,i}$ y el factor de expansión regional $Fexp_h$. Luego, los resultados de la multiplicación se suman para todos los hogares h y todas las opciones de calefacción i .

$$\Delta CN = \sum_h \sum_i ECN_h \times (1 - ErecCN_{h,i}) \times u_{h,i} \times Fexp_h \quad (105)$$

Finalmente, la ecuación (15) determina la variación en las emisiones totales de carbono negro ΔCN , la cual se obtiene al multiplicar las emisiones iniciales de carbono negro de cada hogar ($ECN_h \equiv ECN_{h,i'}$), uno menos la reducción porcentual de emisiones de la opción de calefacción i en el hogar h ($ErecCN_{h,i} \equiv \frac{ECN_{h,i}}{ECN_{h,i'}} - 1$), la variable binaria $u_{h,i}$ y el factor de expansión regional $Fexp_h$. Luego, los resultados de la multiplicación se suman para todos los hogares h y todas las opciones de calefacción i .

3.8. Escenarios

El modelo de optimización se calibra con microdatos de todos los hogares pertenecientes a las comunas que forman parte de cada PDA (ver Tabla 7.1 del Anexo) de forma independiente, los cuales se ubican entre las regiones de O'Higgins y Aysén. Luego, se simulan cinco metas de reducción de emisiones (20%, 40%, 60%, 80% y 99%) que representan escenarios regulatorios hipotéticos que se basan en el principio de costo-efectividad. Este principio establece que se debe privilegiar la reducción de emisiones en los hogares para los cuales sea menos costosa esa reducción, lo cual sería equivalente a implementar un sistema de transacción de emisiones para fuentes residenciales.

Algunos hogares podrían escoger una opción diferente al calefactor a leña actualmente utilizado cuando se simula el escenario base sin meta de reducción, reflejando que el hogar

no usa la opción de calefacción menos costosa. Por lo anterior, se evalúa un caso con costo de ajuste y otro sin costo de ajuste. En el primer caso, este costo de ajuste se agrega a los costos de las opciones de recambio de calefactores y mejoramiento térmico para que todos los hogares escojan el calefactor a leña actualmente utilizado cuando existe una meta porcentual de reducción igual a cero, replicando exactamente el escenario base. Cabe señalar que el costo de ajuste se calcula como la diferencia entre el costo de mantener el calefactor a leña actual y el costo de la opción que elige el modelo en el escenario base si no existiera meta de reducción. En consecuencia, los hogares que elijan una opción diferente a “ninguno” bajo una meta porcentual de reducción igual a cero tendrán un costo de ajuste positivo. Una vez que se incorpora el costo de ajuste al modelo, la nueva elección de estos hogares será “ninguno” reflejando de mejor forma la realidad.

4. RESULTADOS

En este capítulo se exponen los principales resultados de este estudio. Primero, se determinan las emisiones generadas por la combustión residencial de leña en la zona centro-sur de Chile. Luego, se reportan los costos agregados, reducción de emisiones agregadas y opciones de calefacción escogidas por los hogares en cada escenario regulatorio simulado con el modelo de optimización, considerando una desagregación según PDA. Finalmente, se discuten los tipos de calefactores a leña que serían reemplazados en los escenarios regulatorios.

4.1. Emisiones iniciales por combustión residencial de leña según PDA

Las emisiones totales dependen del consumo de leña, nivel de humedad de la leña y cantidad de hogares que utilizan los diferentes calefactores a leña. En la Tabla 4.1 se observa que el consumo promedio de leña tiende a ser mayor en las zonas con PDA localizadas más al sur del país, tales como Temuco y Padre las Casas, Valdivia, Osorno, y Coyhaique y su zona circundante. Lo anterior, se explica porque en esta parte del país las temperaturas son más bajas y la temporada de otoño-invierno es más larga.

Tabla 4.1: Cantidad de hogares que usan calefactores a leña y consumo promedio de leña según PDA

PDA	Tipo de calefactor a leña actual						Consumo promedio de leña por hogar (kg/año)
	Con templador	Cocina a leña	Sin templador	Certificado	Salamandra	Chimenea y otros	
Valle Central de la Región de O'Higgins	57.135	21.732	17.600	8.639	3.127	1.466	1.853
Talca y Maule	19.566	6.219	6.270	3.452	947	133	1.527
Valle Central de la Provincia de Curicó	28.861	10.654	8.373	4.679	1.636	2.671	1.611
Chillán y Chillán Viejo	21.727	9.611	7.851	3.231	886	329	3.052
Los Ángeles	26.716	7.958	6.509	3.773	916	687	2.137
Concepción Metropolitano	89.486	33.619	27.144	12.181	6.138	1.851	1.268
Temuco y Padre las Casas	43.940	15.716	15.397	9.072	2.737	1.199	3.095
Valdivia	22.802	10.118	6.647	3.462	1.126	504	4.870
Osorno	28.456	10.970	10.521	4.951	1.340	767	5.522
Coyhaique y su zona circundante	9.272	3.710	3.619	1.695	534	148	11.036

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Encuesta CASEN.

La combustión de leña para calefacción residencial produce contaminantes del aire locales y globales cuyas emisiones deben ser estimadas para caracterizar el escenario base. En este estudio, las emisiones de contaminantes locales consideran MP_{2,5} y CN, mientras que las

emisiones de contaminantes globales (CO₂, CH₄ y N₂O) se miden en toneladas de CO₂eq. Las emisiones provenientes de la combustión residencial de leña son presentadas en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Emisiones totales por combustión residencial de leña según contaminante (ton/año)

PDA	MP _{2,5}	CN	CO ₂ eq
Valle Central de la Región de O'Higgins	5.357	475	30.416
Talca y Maule	1.495	118	9.128
Valle Central de la Provincia de Curicó	2.806	259	16.237
Chillán y Chillán Viejo	3.593	317	19.907
Los Ángeles	2.713	220	16.789
Concepción Metropolitano	5.672	490	32.847
Temuco y Padre las Casas	6.987	595	41.091
Valdivia	5.361	476	31.136
Osorno	8.422	729	48.848
Coyhaique y su zona circundante	5.483	473	31.983

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.2 se observa que las emisiones totales de los distintos contaminantes son más altas en las zonas geográficas donde se implementaron los PDA de Osorno, PDA de Temuco y Padre las Casas y PDA de Concepción Metropolitano. Esto se explica porque no solo es importante el consumo promedio de leña para determinar las emisiones, sino que también juega un rol la cantidad de hogares que usan calefactores a leña. Por ejemplo, las emisiones totales del PDA de Concepción Metropolitano son similares a las emisiones del PDA de Coyhaique y su zona circundante ya que en el primer PDA hay alrededor de 150.000 hogares más que en el segundo.

4.2. Simulaciones con el modelo de optimización

En esta sección se presentan los resultados para las diferentes metas de reducción de emisiones simuladas en cada PDA de la zona centro-sur de Chile, considerando escenarios con y sin costos de ajuste. Específicamente, se presentan los costos totales anualizados de cumplir las metas de reducción de emisiones de MP_{2,5}, indicador de costo-efectividad (costo por tonelada reducida de MP_{2,5}), costo anualizado de la adquisición de los nuevos calefactores, cantidad de hogares que adoptan las diferentes opciones de calefacción y la variación en las emisiones de MP_{2,5}, CN y CO₂eq.

En términos generales, se observa que las opciones escogidas masivamente por los hogares corresponden a calefactores a pellet “Italy 8100” y equipos de aire acondicionado “Split Muro 24000 BTU”. Los hogares que deciden reemplazar sus calefactores a leña por calefactores a pellet reducen las emisiones de MP_{2,5}, CN y CO_{2eq}, mientras que los hogares que escogen equipos de aire acondicionado reducen las emisiones de MP_{2,5} y CN e incrementan las emisiones de CO_{2eq}. Por otro lado, se puede apreciar un comportamiento similar entre los escenarios con y sin costos de ajuste. A continuación, se detallan las simulaciones realizadas en cada zona con PDA del centro-sur de Chile.

4.2.1 PDA del Valle Central de la región de O’Higgins

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA del Valle Central de la región de O’Higgins. En esta zona geográfica existen más de 100 mil hogares que consumen leña, los cuales tienen consumos promedio relativamente bajos ya que en invierno las temperaturas mínimas y máximas promedian 4°C y 14°C¹¹, respectivamente. En el escenario base todos los hogares simulados usan su calefactor a leña actual, por lo tanto, no hay ahorros de costos o reducción de emisiones. Cuando la meta de reducción es igual a 0% en el escenario con o sin costos de ajuste el modelo replica de forma idéntica el escenario base, ya que los costos de ajuste fueron cero para todos los hogares. Además, los costos totales se incrementan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes, lo cual se refleja en que el costo por tonelada reducida es mayor para las metas más estrictas. Por ejemplo, el costo por tonelada reducida es \$1,45 millones para una meta del 20% y \$5,81 millones para una meta del 99%. También, se observa que el costo de adquisición de los nuevos calefactores es mayor al costo total de la reducción, lo cual se explica porque el reemplazo de calefactores a leña por otras alternativas más eficientes involucra un ahorro en costos de operación. Las opciones escogidas por los hogares son acondicionamiento térmico, calefactores a pellet y aire acondicionado. Es importante notar que para las metas de hasta 80%, las últimas dos opciones son masivamente escogidas, pero cuando la meta de reducción sube a 99% casi todos los hogares deben escoger equipos de aire acondicionado. Las emisiones de CN se reducen proporcionalmente con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO_{2eq} se reducen hasta la meta de 60% y aumentan respecto al escenario base

¹¹ <https://es.weatherspark.com/s/26519/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Rancagua-Chile>

para metas superiores. Lo anterior, se explica porque las estufas a pellet pierden importancia como alternativa para las metas más exigentes.

Tabla 4.3: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Valle Central de la región de O'Higgins

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	0	0	1.563	4.944	10.841	18.013	30.856	0	1.563	4.944	10.841	18.013	30.856
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	0	0	1,45	2,30	3,37	4,20	5,81	0	1,45	2,30	3,37	4,20	5,81
Costo de adquisición (MMS)	0	0	6.917	14.752	26.172	43.065	68.378	0	6.917	14.752	26.172	43.065	68.378
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	5.005	10.381	16.286	31.525	100.006	0	5.005	10.381	16.286	31.525	100.006
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	0	0	3.764	8.532	16.751	23.985	176	0	3.764	8.532	16.751	23.985	176
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	155	0	0	0	0	0	155
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	33	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	109.699	109.699	100.896	90.785	76.661	54.188	9.361	109.699	100.896	90.785	76.661	54.188	9.361
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	0	0	-1.071	-2.143	-3.214	-4.286	-5.304	0	-1.071	-2.143	-3.214	-4.286	-5.304
Variación en CN (ton/año)	0	0	-82	-201	-296	-384	-470	0	-82	-201	-296	-384	-470
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	0	0	-223	-1.937	-3.259	2.058	61.098	0	-223	-1.937	-3.259	2.058	61.098

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 PDA de Talca y Maule

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Talca y Maule. Alrededor de 36 mil hogares consumen leña en esta zona geográfica, los cuales poseen un consumo relativamente bajo de leña ya que en invierno las temperaturas mínimas y máximas promedian 3°C y 13°C¹², respectivamente. Al simular el escenario base sin meta de reducción se observa que algunos hogares deberían cambiar sus calefactores actuales, generando un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de emisiones. Lo anterior, implica que se deben incluir costos de ajuste en estos hogares para que se replique la situación base en la cual ningún hogar desee sustituir su calefactor a leña. En el escenario sin costos de ajuste con una meta de reducción igual a 0%, el modelo mantiene a los hogares utilizando calefactores a leña para que se cumpla esta meta a pesar de que algunos hogares preferían otra opción de calefacción. En el escenario con costos de ajuste con una meta de reducción igual a 0%, todos

¹² <https://es.weatherspark.com/s/25795/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Talca-Chile>

los hogares modelados utilizan calefactores a leña porque es la opción de mínimo costo. También, se observa que los costos totales se incrementan a tasas crecientes con las metas de reducción más exigentes, generando un costo por tonelada reducida mayor. Por ejemplo, los costos por tonelada reducida son \$0,38 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,87 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 20%, mientras que los costos por tonelada reducida se elevan a \$5,6 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$5,96 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 99%. Además, se puede observar que el costo de adquisición de los nuevos calefactores es mayor al costo total de reducción. Esto se explica por la adopción de calefactores más eficientes respecto a los actuales calefactores a leña, lo que se traduce en un ahorro de costos operacionales. Las opciones escogidas por los hogares son equipos de aire acondicionado y calefactores a pellet hasta una meta de 80%. Sin embargo, casi todos los hogares deben escoger equipos de aire acondicionado cuando la meta asciende a 99%. Las emisiones de CN se reducen proporcionalmente con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO_{2eq} se reducen hasta la meta del 80%. Cuando la meta es 99% se elevan las emisiones de CO_{2eq} por la masiva adopción de equipos de aire acondicionado que elevan el consumo eléctrico.

Tabla 4.4: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Talca y Maule

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MM\$)	-17	0	114	797	1.796	3.438	8.289	0	262	1.057	2.196	3.899	8.826
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MM\$)	-0,20	0	0,38	1,33	2,00	2,87	5,60	0	0,87	1,76	2,44	3,26	5,96
Costo de adquisición (MM\$)	431	0	2.126	5.381	9.280	14.546	23.352	0	2.316	5.854	10.394	14.494	23.352
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	369	1.957	2.801	8.199	32.867	0	1.053	1.957	3.456	8.253	32.867
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	480	0	2.083	4.498	8.191	9.956	955	0	1.776	5.022	8.926	9.857	955
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	187	0	0	0	0	0	187
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	36.107	36.587	34.134	30.131	25.594	18.431	2.577	36.587	33.757	29.607	24.195	18.476	2.577
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-82	0	-299	-598	-897	-1.196	-1.480	0	-299	-598	-897	-1.196	-1.480
Variación en CN (ton/año)	0	0	-20	-41	-65	-92	-117	0	-24	-42	-66	-92	-117
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	0	0	-1.165	-2.260	-3.998	-2.141	17.062	0	-609	-2.440	-3.576	-2.031	17.062

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó. En esta zona geográfica existen aproximadamente 57 mil hogares que consumen leña y enfrentan temperaturas similares a las mencionadas para el PDA de Talca y Maule. Al simular el escenario base sin meta de reducción existen 2.308 hogares que adoptarían calefactores a pellet, lo que produce un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de emisiones. Lo anterior, implica que esos hogares no están escogiendo la alternativa de calefacción de mínimo costo en la actualidad, así que se requiere introducir costos de ajustes en el modelo. Los costos totales aumentan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes, lo cual se traduce en costos por tonelada reducida mayores. Por ejemplo, los costos por tonelada reducida son \$-0,25 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,9 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta de reducción del 20%, mientras que estos indicadores de costo-efectividad suben a \$4,67 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$6,83 millones en el escenario con costo de ajuste para una meta de 99%. También, se observa que el costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor que el costo de reducción total ya que la adopción de calefactores más eficientes genera un ahorro en los costos operacionales. Las únicas alternativas escogidas por los hogares son equipos de aire acondicionado y calefactores a pellet cuando la meta es menor o igual a 80%. Sin embargo, la gran mayoría de los hogares deben elegir equipos de aire acondicionado cuando la meta de reducción llega al 99%. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂eq se reducen hasta la meta del 80% y suben para una meta del 99%.

Tabla 4.5: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	-173	0	-142	567	2.204	4.892	12.995	0	506	1.951	4.308	7.251	15.572
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0.39	0	-0.25	0,50	1,30	2,17	4,67	0	0,90	1,73	2,55	3,22	6,83
Costo de adquisición (MMS)	2.077	0	3.008	6.660	13.179	22.857	38.210	0	3.793	9.404	16.636	22.818	38.210
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	791	3.122	4.468	14.145	53.429	0	2.936	4.336	8.201	14.433	53.429
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	2.308	0	2.744	5.037	11.261	14.689	2.008	0	1.991	7.166	12.412	14.427	2008
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	54.566	56.874	53.338	48.714	41.144	28.039	1.436	56.874	51.946	45.371	36.440	28.013	1.436
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-434	0	-561	-1.122	-1.684	-2.245	-2.778	0	-561	-1.122	-1.684	-2.245	-2.278
Variación en CN (ton/año)	-49	0	-63	-115	-160	-207	-257	0	-54	-100	-153	-208	-257
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	-1.948	0	-1.798	-2.826	-6.135	-2.418	26.715	0	-214	-3.322	-3.912	-2.079	26.715

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 PDA de Chillán y Chillán Viejo

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Chillán y Chillán Viejo. En estas dos comunas existen aproximadamente 44 mil hogares que consumen leña. El consumo promedio de leña en esta zona es más alto que en los PDA anteriores, aunque en invierno sus temperaturas mínimas y máximas son similares, promediando 4°C y 14°C¹³, respectivamente. Al simular el escenario base sin meta de reducción se observa que 650 hogares reemplazarían sus calefactores a leña por calefactores a pellet, lo cual produce un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de las emisiones. Por lo anterior, se deben incluir costos de ajuste a estos hogares para replicar una situación en la que ningún hogar desee cambiar su calefactor a leña. Los costos totales se incrementan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes. Esto se puede evidenciar observando cómo crecen los costos por tonelada reducida cuando las metas son mayores. El costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor al costo total de reducción ya que el reemplazo de los calefactores a leña por opciones más eficientes genera un ahorro en costos operacionales. Los

¹³ <https://es.weatherspark.com/s/25136/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Chill%C3%A1n-Chile>

calefactores a pellet son la opción más atractiva hasta una meta del 80%, pero el aire acondicionado toma protagonismo en casi la totalidad de los hogares para una meta del 99%. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO_{2eq} se reducen hasta la meta del 80%. Sin embargo, la adopción masiva de equipos de aire acondicionado cuando la meta es 99% eleva las emisiones de CO_{2eq} por el mayor consumo de electricidad.

Tabla 4.6: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Chillán y Chillán Viejo

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	-32	0	95	1.129	3.019	5.743	13.180	0	276	1.569	3.651	6.684	14.754
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0,17	0	0,13	0,78	1,40	1,99	3,70	0	0,38	1,09	1,69	2,32	4,14
Costo de adquisición (MMS)	584	0	2.846	7.119	12.765	20.889	30.004	0	3.699	7.769	13.627	21.238	30.004
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	272	2.348	3.417	5.384	40.064	0	560	2.546	3.435	5.833	40.064
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	650	0	2.956	6.133	11.596	19.134	3.008	0	3.686	6.705	12.541	19.182	3.008
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	42.985	43.635	40.406	35.153	28.621	19.116	562	43.635	39.388	34.383	27.658	18.619	562
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-180	0	-718	-1.437	-2.156	-2.874	-3.557	0	-718	-1.437	-2.156	-2.874	-3.557
Variación en CN (ton/año)	-12	0	-57	-130	-189	-253	-315	0	-56	-133	-195	-254	-315
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	-768	0	-2.662	-3.973	-8.337	-11.300	30.385	0	-2.432	-4.399	-8.553	-10.949	30.385

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 PDA de Los Ángeles

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Los Ángeles. Esta zona geográfica posee una cantidad similar de hogares con calefactores a leña que el PDA de Chillán y Chillán Viejo, pero con temperaturas invernales levemente menores. En invierno la temperatura mínima promedio es 3°C y la temperatura máxima promedio es 12°C¹⁴. Al simular el escenario base sin meta de reducción existen 426 hogares que reemplazarían sus calefactores a leña por calefactores a pellet, lo cual produce un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de las emisiones. Lo anterior, significa que existen

¹⁴ <https://es.weatherspark.com/s/25134/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Los-%C3%81ngeles-Chile>

hogares que no están escogiendo la alternativa de mínimo costo en la situación actual y se requiere la introducción de costos de ajuste en el modelo. Los costos totales se elevan a tasas crecientes a medida que las metas de reducción se tornan más exigentes. Esto se puede evidenciar observando los costos por tonelada reducida. Por ejemplo, el costo por tonelada reducida es \$0,36 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,72 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 20%, mientras que este indicador de costo-efectividad es \$4,92 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$5,12 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 99%. También, se observa que el costo de adquisición de los calefactores nuevos es muy superior al costo de reducción total, reflejando que las opciones de calefacción escogidas provocan un ahorro en los costos operacionales. Los calefactores a pellet y aire acondicionado son las únicas opciones elegidas hasta una meta del 80%, aunque los calefactores a pellet son la opción más atractiva para la mayoría de los hogares. Los equipos de aire acondicionado son elegidos por casi la totalidad de los hogares cuando la meta de reducción es 99%, aunque algunos hogares escogen calefactores a pellet o calefactores a parafina. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}. Las emisiones de CO₂eq se reducen hasta la meta del 80% por la masiva adopción de calefactores a pellet y crecen para una meta del 99% por la altísima penetración de equipos de aire acondicionado.

Tabla 4.7: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Los Ángeles

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	-27	0	198	1.261	2.859	5.565	13.219	0	394	1.559	3.332	6.123	13.777
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0,24	0	0,36	1,16	1,75	2,56	4,92	0	0,72	1,43	2,04	2,82	5,12
Costo de adquisición (MMS)	383	0	3.492	6.648	11.795	20.997	31.465	0	4.074	7.285	12.834	20.997	31.465
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	1.042	2.615	4.342	8.238	44.285	0	2.119	3.296	4.532	8.238	44.285
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	426	0	3.091	5.407	9.819	17.094	1.418	0	2.923	5.600	10.829	17.094	1.418
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	56
N° hogares adoptando ninguno	46.133	46.559	42.425	38.536	32.397	21.226	799	46.559	41.516	37.662	31.197	21.226	799
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-109	0	-542	-1.085	-1.628	-2.170	-2.686	0	-542	-1.085	-1.628	-2.170	-2.686
Variación en CN (ton/año)	-11	0	-40	-90	-134	-173	-219	0	-38	-86	-131	-173	-219
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	-448	0	-1.738	-3.670	-6.468	-6.689	29.056	0	-1.001	-3.679	-6.651	-6.689	29.056

Fuente: Elaboración propia.

4.2.6 PDA de Concepción Metropolitano

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Concepción Metropolitano. Dentro de las diferentes zonas de PDA analizadas en el centro-sur de Chile, esta es la que posee la mayor cantidad de hogares con calefactores a leña y el consumo promedio más bajo. Además, las temperaturas en invierno son más uniformes, en promedio la temperatura mínima y máxima es 6°C y 13°C¹⁵, respectivamente. Al simular el escenario base sin meta de reducción se observa que 532 hogares reemplazarían su calefactor a leña por calefactores a pellet, reflejando que el calefactor a leña no es la opción de mínimo costo para estos hogares. La necesidad de introducir costos de ajuste para replicar la situación base genera diferencias entre los escenarios con y sin costos de ajuste. Los costos totales se incrementan a tasas crecientes cuando las metas de reducción se tornan más exigentes, lo que se puede evidenciar observando los costos por tonelada reducida. Por ejemplo, los costos por tonelada reducida son \$0,66 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,79 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 20%, mientras que este indicador adopta un valor de \$6,83 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$6,98 millones en el

¹⁵ <https://es.weatherspark.com/s/24147/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Concepci%C3%B3n-Chile>

escenario con costos de ajuste para una meta del 99%. También, se observa que el costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor que el costo de reducción total ya que el recambio de calefactores más eficientes genera un ahorro en los costos operacionales. Es interesante notar que solamente se requiere que 52 mil hogares sustituyan sus calefactores a leña para alcanzar una meta de 60% en la reducción de emisiones de MP_{2,5}. Los calefactores mayoritariamente escogidos son los calefactores a pellet y equipos de aire acondicionado. Sin embargo, a diferencia de otras zonas con PDA los equipos de aire acondicionado son la opción más preferida para metas iguales o mayores a 40%, lo cual podría explicarse por el consumo de leña relativamente bajo en esta zona costera del país. Los equipos de aire acondicionado son elegidos por casi la totalidad de los hogares cuando la meta de reducción es 99%. Los calefactores eléctricos son elegidos por un número muy menor de hogares únicamente cuando la meta es 99%. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂eq se reducen hasta la meta del 40%. A partir de una meta de 60% las emisiones de CO₂eq aumentan respecto al escenario base por la fuerte adopción de equipos de aire acondicionado que tienen alto consumo de electricidad.

Tabla 4.8: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Concepción Metropolitano

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste							Escenario con costos de ajuste				
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MM\$)	-33	0	755	4.064	9.491	18.011	38.382	0	1.021	4.580	10.146	18.706	39.208
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0,27	0	0,66	1,79	2,78	3,96	6,83	0	0,90	2,01	2,98	4,12	6,98
Costo de adquisición (MM\$)	478	0	7.603	20.543	40.562	68.496	109.205	0	8.237	21.975	40.502	68.604	109.205
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	4.360	14.333	31.268	72.266	158.828	0	5.746	14.533	31.377	72.624	158.828
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	532	0	5.147	11.975	21.399	21.399	873	0	4.803	13.415	21.249	21.249	873
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	195	0	0	0	0	0	195
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	368	0	0	0	0	0	368
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	169.887	170.419	160.911	144.110	117.751	76.753	10.154	170.419	159.869	142.470	117.792	76.545	10.154
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-122	0	-1.134	-2.268	-3.403	-4.537	-5.615	0	-1.134	-2.268	-3.403	-4.537	-5.615
Variación en CN (ton/año)	-9	0	-95	-190	-276	-376	-485	0	-96	-188	-277	-377	-485
Variación en CO ₂ eq (ton/año)	-668	0	-1.650	-3.550	153	16.074	64.283	0	-616	-3.840	406	16.363	64.283

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7 PDA de Temuco y Padre las Casas

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Temuco y Padre las Casas. En esta zona geográfica existen aproximadamente 88 mil hogares que consumen leña para calefacción residencial, los cuales deben enfrentar en invierno temperaturas mínimas promedio de 4°C y temperaturas máximas promedio de 11°C¹⁶. Al simular el escenario base sin meta de reducción existen 1.964 hogares que reemplazarían sus calefactores a leña por calefactores a pellet, reflejando que estos hogares tendrían un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de las emisiones si su regla de decisión fuera la minimización de costos. Lo anterior, requiere la introducción de costos de ajuste para replicar la situación en la que cada hogar prefiere su calefactor a leña actual, y además, genera diferencias en los escenarios con y sin costos de ajuste. El modelo mantiene a los hogares utilizando calefactores a leña para una meta de 0% cuando se simula el escenario sin costos de ajuste, pero esta no es una situación eficiente y solo se explica porque se debe cumplir la meta establecida. Los costos totales aumentan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes, lo cual se refleja en los mayores costos por tonelada reducida para las metas más altas. Por ejemplo, los costos por tonelada reducida son \$0,02 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,43 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta de reducción del 20%, mientras que los costos por tonelada reducida son \$4,43 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$4,9 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta del 99%. El costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor al costo total requerido para cumplir la meta de reducción de emisiones ya que el reemplazo de los calefactores a leña por opciones más eficientes genera un ahorro en costos operacionales. Las opciones escogidas por los hogares son acondicionamiento térmico, calefactores a pellet y aire acondicionado. Los calefactores a pellet son mayoritariamente elegidos por los hogares hasta una meta del 80%. En contraste, el acondicionamiento térmico es escogido por muy pocos hogares y solo si la meta de reducción de emisiones es 20%. Finalmente, los equipos de aire acondicionado son elegidos en casi la totalidad de los hogares para una meta de 99%. Es interesante notar que es posible reducir las emisiones de MP_{2,5} hasta en un 80% si menos de la mitad de los hogares cambian sus calefactores a leña, lo cual probablemente se explica

¹⁶ <https://es.weatherspark.com/s/25123/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Temuco-Chile>

porque hay hogares que tienen altos consumos de leña y equipos muy ineficientes. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂eq se reducen hasta una meta del 80%. La masiva adopción de equipos de aire acondicionado con el consecuente incremento de consumo eléctrico eleva las emisiones de CO₂eq para una meta del 99%.

Tabla 4.9: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Temuco y Padre las Casas

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste							Escenario con costos de ajuste				
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MM\$)	-140	0	36	1.745	5.126	10.618	30.659	0	604	2.995	6.996	13.379	33.935
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0,26	0	0,02	0,62	1,22	1,89	4,43	0	0,43	1,07	1,66	2,39	4,90
Costo de adquisición (MM\$)	1.767	0	6.247	13.398	23.258	40.289	60.385	0	7.964	14.439	26.738	40.781	60.385
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	0	1893	5.026	9.096	83.347	0	192	2.738	6.551	9.220	83.347
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	1.964	0	6.419	13.453	22.038	37.880	3.982	0	8.182	13.971	24.750	38.333	3.982
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	129	0	0	0	0	0	129	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	47
N° hogares adoptando ninguno	86.097	88.061	81.512	72.714	60.996	41.084	684	88.061	79.557	71.351	56.759	40.507	684
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-535	0	-1.397	-2.795	-4.192	-5.590	-6.917	0	-1.397	-2.795	-4.192	-5.590	-6.917
Variación en CN (ton/año)	-39	0	-109	-251	-360	-479	-592	0	-115	-257	-366	-480	-592
Variación en CO ₂ eq (ton/año)	-2.725	0	-6.392	-11.595	-18.886	-25.830	63.518	0	-5.992	-11.606	-18.834	-25.494	63.518

Fuente: Elaboración propia.

4.2.8 PDA de Valdivia

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Valdivia. En invierno, esta comuna posee temperaturas mínimas y máximas que promedian 5°C y 11°C¹⁷, respectivamente. El consumo promedio de leña por hogar en esta comuna es alto en relación con las comunas de la zona central. Al simular el escenario base sin meta de reducción se observa que 580 hogares reemplazarían sus calefactores a leña por calefactores a pellet, reflejando que estos hogares desperdician un potencial ahorro en los costos de calefacción bajo la situación actual. En el escenario con costos de ajuste los costos totales de cumplimiento son mayores respecto al escenario sin costos de ajuste. Sin embargo, en ambos

¹⁷ <https://es.weatherspark.com/s/24136/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Valdivia-Chile>

escenarios los costos totales se incrementan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes. Esto se puede evidenciar observando los costos por tonelada reducida. Por ejemplo, los costos por tonelada reducida son \$0,23 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$0,44 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta de 20%, mientras que los costos por tonelada reducida son \$3,59 millones en el escenario sin costos de ajuste y \$3,79 millones en el escenario con costos de ajuste para una meta de 99%. El costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor al costo de reducción total ya que el reemplazo de los calefactores a leña por opciones más eficientes genera un ahorro en costos operacionales. Las opciones escogidas por los hogares para recambio son acondicionamiento térmico, calefactores a pellet y equipos de aire acondicionado. El acondicionamiento térmico solo es escogido por nueve hogares para metas de 20% y/o 40%. Los calefactores a pellet son la mejor alternativa para la gran mayoría de los hogares que deben cambiar sus calefactores a leña mientras la meta de reducción no supere el 80%. Cuando la meta de reducción asciende a 99%, los equipos de aire acondicionado son escogidos en casi la totalidad de los hogares. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂eq se reducen hasta la meta del 80% y se elevan para una meta del 99%. Lo último, se explica principalmente por la mayor penetración de equipos de aire acondicionado que tienen alto consumo de electricidad.

Tabla 4.10: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Valdivia

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	-35	0	257	1.744	4.520	8.431	19.076	0	472	2.237	5.261	9.406	20.164
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	-0,16	0	0,23	0,81	1,4	1,96	3,59	0	0,44	1,04	1,63	2,19	3,79
Costo de adquisición (MMS)	521	0	4.076	8.658	14.513	23.787	30.825	0	4.255	9.076	15.697	24.742	30.825
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	180	1.808	2.394	3.074	41.680	0	426	1.824	2.424	3.074	41.680
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	580	0	4.356	8.215	14.314	24.104	2.697	0	4.369	8.704	15.606	25.164	2.697
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	9	9	0	0	0	0	9	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	44.079	44.659	40.113	34.626	27.950	17.480	281	44.659	39.854	34.130	26.628	16.420	281
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-213	0	-1.072	-2.144	-3.216	-4.289	-5.307	0	-1.072	-2.144	-3.216	-4.289	-5.307
Variación en CN (ton/año)	-19	0	-83	-214	-301	-383	-474	0	-91	-222	-295	-393	-474
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	-916	0	-4.686	-7.794	-15.081	-22.169	48.399	0	-4.515	-7.945	-15.814	-21.977	48.399

Fuente: Elaboración propia.

4.2.9 PDA de Osorno

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Osorno. En esta comuna aproximadamente 57 mil hogares consumen leña, los cuales enfrentan inviernos fríos con temperaturas mínimas y máximas promedio de 3°C y 10°C¹⁸, respectivamente. El consumo promedio de leña por hogar es uno de los más altos dentro de las zonas con PDA analizadas en este estudio. Al simular el escenario base sin meta de reducción existen 1.389 hogares que recambiarían sus calefactores a leña, lo que implica un ahorro en los costos de calefacción y una reducción de emisiones. Lo anterior, requiere la introducción de costos de ajuste en esos hogares para que se represente la situación actual en la cual no existen incentivos para cambiar los calefactores a leña. En los escenarios sin y con costos de ajuste se aprecia que los costos totales se incrementan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes, lo cual se refleja en que el costo por tonelada reducida se eleva para metas altas. También, se puede observar que el costo de adquisición de los nuevos calefactores es mayor al costo total de reducción. Esto se explica por la adopción de calefactores más

¹⁸ <https://es.weatherspark.com/s/24134/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Osorno-Chile>

eficientes respecto a los calefactores a leña lo que se traduce en un ahorro en costos operacionales. Las opciones escogidas por los hogares son acondicionamiento térmico, aire acondicionado y calefactores a pellet. Aunque la opción de acondicionamiento térmico es adoptada por muy pocos hogares y para metas de reducción muy específicas. Los calefactores a pellet son masivamente escogidos hasta la meta del 80%. Sin embargo, casi todos los hogares deben adoptar equipos de aire acondicionado cuando la meta asciende a 99%. Las emisiones de CN se reducen proporcionalmente con las emisiones de MP_{2,5}. En contraste, las emisiones de CO₂eq se reducen hasta la meta del 80% y se elevan sustancialmente para una meta de 99%. Esto sucede por la masiva adopción de equipos de aire acondicionado que utilizan electricidad.

Tabla 4.11: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Osorno

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MM\$)	-74	0	210	1.994	5.722	10.906	26.983	0	623	3.136	7.270	13.005	29.782
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MM\$)	-0,13	0	0,12	0,59	1,13	1,61	3,23	0	0,36	0,93	1,43	1,93	3,57
Costo de adquisición (MM\$)	1.250	0	5.996	13.474	20.646	32.200	39.649	0	7.460	13.803	22.398	35.982	39.649
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	187	1.640	1.951	2.672	52.822	0	322	1.758	2.672	2.736	52.822
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	1.389	0	6.520	13.592	21.463	33.756	4.041	0	7.908	14.006	22.864	37.910	4.041
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	42
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	34	0	0	0	0	34	0	0	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	55.616	57.005	50.297	41.738	33.590	20.576	99	57.005	48.740	41.240	31.468	16.358	99
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-539	0	-1.684	-3.369	-5.053	-6.738	-8.338	0	-1.684	-3.369	-5.053	-6.738	-8.338
Variación en CN (ton/año)	-40	0	-122	-307	-491	-605	-724	0	-130	-334	-493	-610	-724
Variación en CO ₂ eq (ton/año)	-2.411	0	-7.226	-13.346	-22.594	-34.618	74.902	0	-7.276	-13.184	-23.411	-35.921	74.902

Fuente: Elaboración propia.

4.2.10 PDA Coyhaique y su zona circundante

En la Tabla 4.12 se presentan los resultados de las simulaciones para el PDA de Coyhaique y su zona circundante. En esta comuna casi 19 mil hogares consumen leña para calefacción residencial, siendo el PDA con menos hogares analizados. Sin embargo, el consumo promedio de este combustible es el más alto de la zona centro-sur de Chile. Además, los

inviernos son muy fríos con temperaturas mínimas y máximas promedio de -1°C y 5°C ¹⁹, respectivamente. En el escenario base todos los hogares simulados usan su calefactor a leña, así que no hay necesidad de introducir costos de ajuste. Los costos totales aumentan a tasas crecientes con metas de reducción más exigentes, lo cual se refleja en mayores costos por tonelada reducida. Por ejemplo, el costo por tonelada reducida es \$0,49 millones para una meta de reducción del 20% y el costo es \$3,71 millones para una meta del 99%. El costo de adquisición de los calefactores nuevos es mayor que el costo total de reducción ya que el reemplazo de los calefactores a leña por opciones más eficientes genera un ahorro en costos operacionales. Las opciones escogidas por los hogares son acondicionamiento térmico, calefactores eléctricos, calefactores a pellet, y aire acondicionado. Los calefactores a pellet son escogidos de forma masiva hasta una meta de 80%, pero los equipos de aire acondicionado son preferidos por casi la totalidad de los hogares cuando la meta de reducción asciende a 99%. En contraste, son escasos los hogares que prefieren calefactores eléctricos y acondicionamiento térmico. Las emisiones de CN se reducen en directa proporción con las emisiones de $\text{MP}_{2,5}$, mientras que las emisiones de CO_2eq se reducen hasta la meta del 80%. Sin embargo, las emisiones de CO_2eq se elevan de forma importante cuando se establece una meta de 99% por la amplia adopción de equipos de aire acondicionado.

¹⁹ <https://es.weatherspark.com/s/25106/3/Tiempo-promedio-en-el-invierno-en-Coihaique-Chile>

Tabla 4.12: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en el PDA de Coyhaique y su zona circundante

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MMS)	0	0	545	1.637	3.683	7.618	20.181	0	545	1.637	3.683	7.618	20.181
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MMS)	0	0	0,49	0,74	1,11	1,73	3,71	0	0,49	0,74	1,11	1,73	3,71
Costo de adquisición (MMS)	0	0	1.951	3.947	8.177	10.472	13.217	0	1.951	3.947	8.177	10.472	13.217
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	19	35	232	438	17.498	0	19	35	232	438	17.498
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	0	0	2.153	4.359	7.814	11.304	1.438	0	2.153	4.359	7.814	11.304	1.438
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico 1.800 W)	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	0	0	271	0	0	0	0	0	271	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° hogares adoptando ninguno	18.978	18.978	16.805	14.583	10.660	7.235	23	18.978	16.805	14.583	10.660	7.235	23
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	0	0	-1.096	-2.193	-3.289	-4.386	-5.428	0	-1.096	-2.193	-3.289	-4.386	-5.428
Variación en CN (ton/año)	0	0	-81	-205	-343	-407	-470	0	-81	-205	-343	-407	-470
Variación en CO _{2eq} (ton/año)	0	0	-4.601	-8.629	-14.073	-22.527	48.705	0	-4.601	-8.629	-14.073	-22.527	48.705

Fuente: Elaboración propia.

4.2.11 Análisis consolidado en zonas con PDA del centro-sur de Chile

En el análisis previo se determinó que los costos totales de reducción se incrementan a tasas crecientes en todas las zonas con PDA del centro-sur de Chile. Específicamente, las zonas donde se implementaron los PDA de Talca y Maule, PDA de Los Ángeles, PDA de Chillán y Chillán Viejo, y PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó tienen los menores costos totales de cumplimiento, mientras que los PDA de Concepción Metropolitano, PDA de Temuco y Padre las Casas, y PDA del Valle Central de la región de O'Higgins tienen los mayores costos totales de cumplimiento. Lo anterior, se explica principalmente por el número de hogares y consumo promedio de leña en cada una de estas zonas. Sin embargo, los resultados cambian si se analiza el costo por tonelada reducida. Específicamente, los PDA de Coyhaique, PDA de Valdivia y PDA de Osorno poseen los menores indicadores de costos por tonelada reducida, mientras que los PDA de Concepción Metropolitano y PDA de la Provincia de Curicó poseen los mayores indicadores de costos por tonelada reducida.

Las opciones de calefacción preferidas por los hogares para cumplir con la meta de reducción de emisiones son los calefactores a pellet “Italy 8100” y los equipos de aire acondicionado “Split Muro 24000 BTU”. Muy pocos hogares prefieren otras alternativas como acondicionamiento térmico, calefactores a parafina o aire acondicionado de menor potencia, y esto solo ocurre cuando se consideran ciertas metas específicas. Además, se concluye que el calefactor a pellet tiende a ser una opción más costo-efectiva en hogares con alto consumo de leña, mientras que el equipo de aire acondicionado es más costo-efectivo en hogares que presentan un bajo consumo de leña.

Al replicar el escenario base sin meta de reducción se observa que en casi todas las zonas con PDA se requiere incluir costos de ajuste, excepto en el PDA del Valle Central de la región de O’Higgins y el PDA de Coyhaique y su zona circundante. Lo anterior, se explica porque los hogares no necesariamente escogen la opción de mínimo costo en la realidad. Algunas posibles explicaciones incluyen desinformación, preferencia cultural por la utilización de leña, no contar con los recursos suficientes para invertir en otra opción de calefacción, entre otras. Por otro lado, se establece que una meta de reducción de emisiones de $MP_{2,5}$ también contribuye a reducir las emisiones de carbono negro y CO_{2eq} cuando las metas son menores a 60% u 80%. Cuando la meta de reducción de $MP_{2,5}$ es igual a 99%, se observa un aumento en las emisiones de CO_{2eq} ya que se requiere instalar masivamente equipos de aire acondicionado que tienen altos consumos de electricidad.

En la Tabla 4.13 se presenta el análisis consolidado de todas las zonas con PDA incluidas en este estudio. Al simular el escenario base sin meta de reducción existen 8.329 hogares que reemplazarían sus calefactores a leña, obteniendo una reducción de 2.214 toneladas anuales de $MP_{2,5}$. Para evitar esta situación que no se observa en la realidad es necesario introducir costos de ajuste para estos hogares, lo cual genera diferencias entre los escenarios con y sin costos de ajuste. Las opciones elegidas por la gran mayoría de los hogares son los calefactores a pellet y aire acondicionado. Muy pocos hogares escogen otras opciones como acondicionamiento térmico, calefactor a parafina y calefactor eléctrico. También, se observa que las metas de reducción menos exigentes no requieren que todos los hogares reemplacen su calefactor actual. Incluso se puede alcanzar hasta una meta de 80% sin que la mitad de los hogares reemplacen sus calefactores a leña. Finalmente, se concluye que existen beneficios

indirectos asociados a la reducción de las emisiones de CN para todas las metas y CO₂eq para metas de hasta 80%.

Tabla 4.13: Costos y emisiones reducidas según escenario regulatorio en todas las zonas con PDA del centro-sur de Chile

Indicador	Escenario Base	Escenario sin costos de ajuste						Escenario con costos de ajuste					
		Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%	Meta 0%	Meta 20%	Meta 40%	Meta 60%	Meta 80%	Meta 99%
Costo total (MM\$)	-531	0	3.631	19.882	49.261	93.235	213.820	0	6.266	25.665	57.684	104.084	227.055
Costo/tonelada reducida de MP _{2,5} (MM\$)	-0.24	0	0,38	1,04	1,71	2,43	4,51	0	0,65	1,34	2,01	2,72	4,84
Costo de adquisición (MM\$)	7.491	0	44.262	100.580	180.347	297.598	444.690	0	50.666	108.304	193.175	303.193	444.690
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Muro 24000 BTU)	0	0	12.225	40.132	72.185	155.037	624.826	0	18.378	43.404	79.166	156.374	624.826
N° hogares adoptando pellet (Italy 8100)	8.329	0	39.233	81.201	144.646	213.301	20.596	0	41.555	87.480	153.742	218.505	20.420
N° hogares adoptando electricidad (Termoventilador eléctrico)	0	0	0	0	0	0	213	0	0	0	0	0	213
N° hogares adoptando aire acondicionado (Split Inverter Muro Wifi 9000)	0	0	0	0	0	0	752	0	0	0	0	0	752
N° hogares adoptando acondicionamiento térmico	0	0	171	43	271	0	0	0	205	0	271	0	0
N° hogares adoptando parafina (Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco)	0	0	0	0	0	0	103	0	0	0	0	0	103
N° hogares adoptando ninguno	664.147	672.476	620.837	551.090	455.364	304.128	25.976	672.476	612.328	541.582	439.458	297.587	25.976
Variación en MP _{2,5} (ton/año)	-2.214	0	-9.574	-19.154	-28.732	-38.311	-47.410	0	-9.574	-19.154	-28.732	-38.311	-46.910
Variación en CN (ton/año)	-183	0	-752	-1.744	-2.615	-3.359	-4.123	0	-767	-1.768	-2.615	-3.378	-4.123
Variación en CO ₂ eq (ton/año)	-10.304	0	-32.141	-59.580	-98.678	-109.560	464.123	0	-27.479	-60.981	-97.677	-109.246	338.742

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Opciones de calefacción reemplazadas

Es clave determinar qué opciones de calefacción son las más convenientes de adoptar bajo diferentes metas de reducción de emisiones, pero también es relevante conocer cuáles calefactores a leña estarían siendo reemplazados. En la Tabla 14 se observa que en el escenario base sin meta de reducción se reemplazarían calefactores a leña en hogares con consumos altos de este combustible. Cuando se aplican metas de reducción, los primeros calefactores a leña en ser reemplazados serían chimeneas y salamandras que son equipos de baja eficiencia. Luego, se reemplazarían calefactores a leña sin templador y cocinas a leña.

Finalmente, le seguirían los calefactores a leña con templador y calefactores a leña certificados. En el Anexo 2 se encuentran las tablas con los resultados según PDA.

Tabla 4.14: Cantidad de calefactores a leña reemplazados en todas las zonas con PDA del centro-sur de Chile

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad inicial de calefactores a leña	28.456		10.970		10.521		4.951		1.340		767	
Escenarios	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	4%	0%	1%	0%	6%	0%	19%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	1%	2%	31%	37%	4%	5%	40%	38%	52%	45%
40%	3%	5%	12%	15%	63%	61%	11%	12%	62%	58%	74%	57%
60%	18%	22%	26%	29%	75%	74%	22%	22%	80%	76%	83%	71%
80%	48%	50%	43%	45%	88%	87%	32%	33%	89%	87%	92%	89%
99%	96%	96%	93%	93%	99%	99%	94%	94%	99%	99%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

El orden en que los calefactores a leña deben ser reemplazados en las simulaciones depende fundamentalmente de su eficiencia. Un calefactor a leña con baja eficiencia implica que un nuevo calefactor requerirá menos consumo de combustible para producir la misma cantidad de energía, reduciendo así los costos de calefacción. Además, se observa un mayor reemplazo de calefactores a leña en hogares que tienen un alto consumo de leña. Esto se explica porque el consumo equivalente es estimado en base a la eficiencia, así que la reducción es inversamente proporcional a la eficiencia.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se aplica un modelo de optimización para simular el comportamiento de los hogares sobre la elección de calefacción residencial bajo distintas metas de reducción de emisiones de $MP_{2,5}$. Las opciones de los hogares son reemplazar su calefactor a leña actual por un calefactor más eficiente, acondicionar térmicamente su hogar o mantener su calefactor a leña. Los calefactores más eficientes incluidos en la modelación son 28 y se caracterizan por utilizar combustibles distintos a la leña, tales como parafina, gas licuado, electricidad o pellet. El objetivo del modelo es minimizar el costo total de reducir las emisiones de $MP_{2,5}$ en un cierto porcentaje, considerando las distintas alternativas escogidas por los hogares. Este modelo fue calibrado con datos a nivel de hogar en diez zonas del centro-sur de Chile que han implementado un PDA, considerando metas de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 99%, considerando escenarios con o sin costos de ajuste, que permitieran replicar la situación base.

En cada zona del centro-sur de Chile donde se ha implementado un PDA, los costos totales de cumplimiento crecen cuando las metas de reducción son más exigentes. Sin embargo, los costos por tonelada reducida son más bajos en las zonas donde existe un mayor consumo promedio de leña por hogar. Lo anterior, se explica porque cada sustitución de un calefactor a leña en un hogar de alto consumo de leña reduce fuertemente las emisiones en comparación con un hogar de bajo consumo de leña.

Las opciones de calefacción más preferidas por los hogares son el equipo de aire acondicionado “Split Muro 24000 BTU” y el calefactor a pellet “Italy 8100” debido a su bajo indicador de costo-efectividad. Además, se observa que la primera opción es preferida en hogares de bajo consumo de leña y la segunda es preferida en hogares con alto consumo de leña. También, se concluye que no es costo-efectivo financiar programas de acondicionamiento térmico en el caso de que el objetivo es exclusivamente reducir emisiones de $MP_{2,5}$.

Cuando se simula el escenario base sin meta de reducción se observa que algunos hogares deberían recambiar sus calefactores a leña porque no es la opción de mínimo costo. Sin embargo, esto no ocurre en la realidad y se agrega un costo de ajuste para simular mejor la situación real. En consecuencia, se pueden implementar campañas informativas para que cada hogar pueda conocer su mejor opción de calefacción.

Las emisiones de CN disminuyen proporcionalmente con las metas de reducción de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂eq se reducen en la mayoría de los PDA hasta la meta del 80%. Cuando la meta de reducción es igual a 99%, las emisiones de CO₂eq aumentan respecto del escenario base. Así, es posible afirmar que establecer metas de 99% para el MP_{2,5} es muy costoso y tiene incidencia en las metas de carbono neutralidad del país.

Además de saber cuáles son las mejores opciones de calefacción que los hogares tienen para reducir emisiones de MP_{2,5}, es importante conocer cuáles son los calefactores a leña que se deben reemplazar con mayor urgencia. Los resultados demuestran que la sustitución de chimeneas y salamandras son prioritarias, seguidas por los calefactores a leña sin templador y cocinas a leña. En último lugar, están los calefactores a leña con templador y calefactores a leña certificados. Este orden depende mucho de la eficiencia del calefactor ya que una menor eficiencia implica mayor consumo de leña.

Existieron dos grandes limitaciones para la realización de este estudio. La primera fue no contar con información actualizada y detallada sobre el consumo de combustibles para calefacción residencial. La segunda fue la falta de información sobre el efecto rebote producido por el recambio de calefactores. Este último valor es de suma importancia ya que permite generar simulaciones más reales. Finalmente, se puede mencionar que la generación de electricidad en Chile será menos contaminante en el futuro debido a la mayor penetración de energías renovables no convencionales. Así, que los factores de emisión de calefactores eléctricos y aire acondicionado disminuirán respecto a los calculados en esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Abu Qadourah, J., Al-Falahat, A. A. M., Alwashdeh, S. S., & Nytsch-Geusen, C. (2022). Improving the energy performance of the typical multi-family buildings in Amman, Jordan. City. *Territory and Architecture*, 9(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40410-022-00151-8>
- Asghar, K., Ali, A., Tabassum, A., Nadeem, S. G., Hakim, S. T., Amin, M., ... & Hussain, M. (2022). Assessment of particulate matter (PM) in ambient air of different settings and its associated health risk in Haripur city, Pakistan. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.256190>
- Barčić, A. P., Grošelj, P., Oblak, L., Motik, D., Kaputa, V., Glavonjić, B., ... & Perić, I. (2020). Possibilities of Increasing Renewable Energy in Croatia, Slovenia and Slovakia-Wood Pellets. *Wood Industry/Drvna Industrija*, 71(4). <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.2024>
- Besser, D., & Vogdt, F. U. (2017). First steps towards low energy buildings: how far are Chilean dwellings from nearly zero-energy performances?. *Energy Procedia*, 132, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.642>
- Boardman, B. (1991). Fuel poverty: from cold homes to affordable warmth. Pinter Pub Limited.
- Calvo, R., Álamos, N., Huneus, N., O’Ryan, R. (2022). Energy poverty effects on policy-based PM_{2,5} emissions mitigation in southern and central Chile. *Energy Policy*, 161, 112762. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112762>
- Cespi, D., Passarini, F., Ciacci, L., Vassura, I., Castellani, V., Collina, E., ... & Morselli, L. (2014). Heating systems LCA: Comparison of biomass-based appliances. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 89-99. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0611-3>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (2012). Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la región Metropolitana de Santiago. Available at: https://www.gobiernosantiago.cl/wp-content/uploads/2014/12/Informe_Final_estudio_Lena_CDT_2012_con_anexos.pdf
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (2015). Medición del consume nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera. Available at: <https://calefaccionsustentable.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/Medicion-del-consumo-nacional-de-lena-y-otros-combustibles-solidos-derivados-de-la-madera.pdf>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2016). Estudio comparativo del recambio de calefactores a leña por sistema eléctrico invierno. Available at: https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2018-05-18_12-56-26144315.pdf

- Dedoussi, I. C., Eastham, S. D., Monier, E., & Barrett, S. R. (2020). Premature mortality related to United States cross-state air pollution. *Nature*, 578(7794), 261-265. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1983-8>
- Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., ... & Schwartz, J. D. (2017). Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513-2522. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>
- Environment and Climate Change Canada Pollutant Inventories and Reporting Division. (2016). Canada's Black Carbon Inventory. Available at: <https://ec.gc.ca/air/3F796B41-0B87-4C14-B76D-899D23CD0295/Black%20Carbon%202016-EN-Final.pdf>
- EPA. (2014). Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. Available at: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf
- Flamant, G., Bustamante, W., Schmitt, C., Bunster, V., & Osorio, C. (2022). Thermal and environmental evaluation of mid-rise social housing retrofit under different climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 46, 103724. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103724>
- Franklin, B. A., Brook, R., & Pope III, C. A. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*, 40(5), 207-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003>
- Freire, J. (2016). Eficiencia energética y efecto rebote. Available at: https://www.academia.edu/27542535/Eficiencia_energ%C3%A9tica_y_efecto_rebote._Conceptos_m%C3%A9todos_y_pol%C3%ADticas
- Galantucci, V., & Duong, V. M. (2021). Solid Biofuels in Residential Heating Appliances and Related Air Pollution in Northern Italy. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(5). <https://doi.org/10.15244/pjoes/132813>
- Greenhouse Gas Protocol. (2017). Emission Factors from Cross-Sector Tools. Available at: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools>
- Healy, J. D., & Clinch, J. P. (2004). Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland. *Energy Policy*, 32(2), 207-220. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00265-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00265-3)
- Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., Álamos, N., Amigo, C., Arrieta, D., Basoa, K., Billi, M., Blanco, G., Boisier, J.P., Calvo, R., Casielles, I., Castro, M., Chahuán, J., Christie, D., Cordero, L., Correa, V., Cortés, J., Fleming, Z., Gajardo, N., Gallardo, L., Gómez, L., Insunza, X., Iriarte, P., Labraña, J., Lambert, F., Muñoz, A., Opazo, M., O’Ryan, R., Osses, A., Plass, M., Rivas, M., Salinas, S., Santander, S., Seguel, R., Smith, P., Tolvett, S (2020). El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. Available at: www.cr2.cl/contaminacion/

IQ Air (2021). World's most polluted cities (historical data 2017-2021) Available at: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities?continent=59af929e3e70001c1bd78e50&country=&state=&page=1&perPage=50&cities=>

IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Available at: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf

IPCC. (2021). Sixth Assessment Report. Available at: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

Ji, C., Hong, T., & Kim, H. (2022). Statistical analysis of greenhouse gas emissions of South Korean residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111981. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111981>

Jorquera, H., Barraza, F., Heyer, J., Valdivia, G., Schiappacasse, L. N., & Montoya, L. D. (2018). Indoor PM_{2.5} in an urban zone with heavy wood smoke pollution: The case of Temuco, Chile. *Environmental Pollution*, 236, 477-487. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.085>

Kukkonen, J., López-Aparicio, S., Segersson, D., Geels, C., Kangas, L., Kauhaniemi, M., ... & Brandt, J. (2020). The influence of residential wood combustion on the concentrations of PM_{2.5} in four Nordic cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(7), 4333-4365. <https://doi.org/10.5194/acp-2019-564>

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>

Li, Z., Sjödin, A., Romanoff, L. C., Horton, K., Fitzgerald, C. L., Eppler, A., ... & Naeher, L. P. (2011). Evaluation of exposure reduction to indoor air pollution in stove intervention projects in Peru by urinary biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbon metabolites. *Environment International*, 37(7), 1157-1163. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.03.024>

Lin, H., Liu, T., Xiao, J., Zeng, W., Li, X., Guo, L., Xu, Y., Zhang, Y., Vaughn, M.G., Nelson, E.J., Qian, Z., Ma, W. (2016). Quantifying short-term and long-term health benefits of attaining ambient fine particulate pollution standards in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 137, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.037>

Lundmark, R., & Mansikkasalo, A. (2009). European trade of forest products in the presence of EU policy. *Journal of Cleaner Production*, 17, S18-S26. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.01.010>

Mardones, C., & Sanhueza, L. (2015). Tradable permit system for PM_{2.5} emissions from residential and industrial sources. *Journal of Environmental Management*, 157, 326-331. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.054>

- Mardones, C., & Saavedra, A. (2016). Comparison of economic instruments to reduce PM2.5 from industrial and residential sources. *Energy Policy*, 98, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.011>
- Mardones, C. (2019). Determining the ‘optimal’ level of pollution (PM2.5) generated by industrial and residential sources. *Environmental Impact Assessment Review*, 74, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.09.003>
- Mardones, C., & Cornejo, N. (2020a). Ex-post evaluation of environmental decontamination plans on air quality in Chilean cities. *Journal of Environmental Management*, 256, 109929. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109929>
- Mardones, C., & Cornejo, N. (2020b). Ex-post evaluation of a program to reduce critical episodes due to air pollution in southern Chile. *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106334>
- Mardones, C. (2021a). Ex-post evaluation of residential insulation program in the city of Temuco, Chile. *Energy for Sustainable Development*, 62, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.04.003>
- Mardones, C. (2021b). Ex-post evaluation and cost-benefit analysis of a heater replacement program implemented in southern Chile. *Energy*, 227, 120484. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120484>
- Martínez-Soto, A., Vera, C. C. A., Boso, A., Hofflinger, A., & Shupler, M. (2021). Energy poverty influences urban outdoor air pollution levels during COVID-19 lockdown in south-central Chile. *Energy policy*, 158, 112571. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112571>
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2022). Informe Precios Sociales 2022. Available at: http://sni.gob.cl/storage/docs/Precios_Sociales_Vigentes.pdf
- Ministerio de Energía. (2018). Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018. Available at: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf
- Ministerio de Energía. (2020). Estrategia de transición energética residencial. Available at: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_de_transicion_energetica_residencial13082020.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Reporte 2005-2015: Registro de Emisiones y de Transferencia de Contaminantes. Available at: [https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/Decimo_reporte RETc_2005-2015.pdf](https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/Decimo_reporte_RETc_2005-2015.pdf)
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019a). Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas. Available at: http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=399874fc-f2d3-466f-9460-a3eb9d76a30f&fname=Libro_Manual%20de%20MMA_def_online.pdf&access=public

- Ministerio del Medio Ambiente (2019b). Registro de emisiones y transferencia de contaminantes. Available at: <https://retc.mma.gob.cl/indicadores/emisiones-al-aire/>
- Nesterovic, A., Djatkov, D., Viskovic, M., Martinov, M., & Adamovic, D. (2021). Air pollutants emissions from biomass combustion in the City of Novi Sad, Serbia. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01882-3>
- Ozgen, S., & Caserini, S. (2018). Methane emissions from small residential wood combustion appliances: Experimental emission factors and warming potential. *Atmospheric Environment*, 189, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.006>
- Pérez-Fargallo, A., Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Trebilcock, M. (2020). Energy poverty risk mapping methodology considering the user's thermal adaptability: the case of Chile. *Energy Sustainable Development*, 58, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.07.009>
- Pope, C.A., Coleman, N., Pond, Z.A., & Burnett, R.T. (2020). Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environmental Research*, 2020, 183, 108924. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108924>
- Porrás-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., Cartes, I., Piggot-Navarrete, J., & Pérez-Fargallo, A. (2020). Energy poverty analyzed considering the adaptive comfort of people living in social housing in the central-south of Chile. *Energy and Buildings*, 223, 110081. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110081>
- Quinteiro, P., Tarelho, L., Marques, P., Martín-Gamboa, M., Freire, F., Arroja, L., & Dias, A. C. (2019). Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. *Science of the Total Environment*, 689, 580-589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.420>
- Reyes, R., Nelson, H., Navarro, F., & Retes, C. (2015). The firewood dilemma: human health in a broader context of well-being in Chile. *Energy for Sustainable Development*, 28, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.07.005>
- Reyes, R., Schueftan, A., Ruiz, C., & González, A. D. (2019). Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses?. *Energy Policy*, 124, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.022>
- Sawada, N., Nakaya, T., Kashima, S., Yorifuji, T., Hanibuchi, T., Charvat, H., ... & Tsugane, S. (2022). Long-term exposure to fine particle matter and all-cause mortality and cause-specific mortality in Japan: the JPHC Study. *BMC Public Health*, 22(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-12829-2>
- Sawyer, A., Sherriff, N., Bishop, D., Darking, M., & Huber, J. W. (2022). “It’s changed my life not to have the continual worry of being warm”—health and wellbeing impacts of a local fuel poverty programme: a mixed-methods evaluation. *BMC Public Health*, 22(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-12994-4>

- Schueftan, A., & González, A. (2015a). Disminución de la contaminación del aire y de la pobreza energética por calefacción a leña en la ciudad de Valdivia. En R. Barra & J. Rojas (Ed.), *Desarrollo sustentable: Miradas interdisciplinarias de experiencias en Chile y Brasil* (122-133). Available at: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/115425>
- Schueftan, A., & González, A. D. (2015b). Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. *Energy Policy*, 79, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.008>
- Schueftan, A., Sommerhoff, J., & González, A. D. (2016). Firewood demand and energy policy in south-central Chile. *Energy for Sustainable Development*, 33, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.004>
- Seebauer, S. (2018). The psychology of rebound effects: Explaining energy efficiency rebound behaviours with electric vehicles and building insulation in Austria. *Energy Research & social science*, 46, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.006>
- Seljeskog, M., Goile, F., & Skreiberg, Ø. (2017). Recommended revisions of Norwegian emission factors for wood stoves. *Energy Procedia*, 105, 1022-1028. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.447>
- SICAM. (2017). Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas para las comunas de Temuco y Padre las Casas, año base 2017. Available at: http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=3b3f2447-86a8-41b2-a234-3e55b6c7b4d3&fname=Informe%20Final_Actualizaci%C3%B3n%20Inv%20Emis%20Tc%20y%20PLC_Vfinal.pdf&access=public
- Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. T., & Faaij, A. (2011). The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), 250-278. <https://doi.org/10.1002/bbb.277>
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2634-2639. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>
- Vergara, L. M., Gruis, V., & van der Flier, K. (2019). Understanding housing management by low-income homeowners: Technical, organisational and sociocultural challenges in Chilean condominium housing. *Buildings*, 9(3), 65. <https://doi.org/10.3390/buildings9030065>
- Walker, R., McKenzie, P., Liddell, C., & Morris, C. (2014). Estimating fuel poverty at household level: An integrated approach. *Energy and Buildings*, 80, 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.004>
- Ward, T. J., Palmer, C. P., Houck, J. E., Navidi, W. C., Geinitz, S., & Noonan, C. W. (2009). Community woodstove changeout and impact on ambient concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and phenolics. *Environmental Science & Technology*, 43(14), 5345-5350. <https://doi.org/10.1021/es8035253>

World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>

Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69. <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>

Zhou, Y., Zi, T., Lang, J., Huang, D., Wei, P., Chen, D., & Cheng, S. (2020). Impact of rural residential coal combustion on air pollution in Shandong, China. *Chemosphere*, 260, 127517. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127517>

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1. Comunas con PDA

Tabla 7.1: Comunas con PDA

PDA	Comunas	Enlace PDA
Valle Central de la Región de O'Higgins	Graneros	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-15-2013-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-para-el-Valle-Central-de-la-region-del-Libertador-General-Bernardo-Ohiggins.pdf
	Rancagua	
	Doñihue	
	Olivar	
	Coltauco	
	Coinco	
	Quinta de Tilcoco	
	San Vicente de Tagua Tagua	
	Placilla	
	Mostazal	
	Codegua	
	Machalí	
	Malloa	
Rengo		
Requínoa		
San Fernando		
Chimbarongo		
Talca y Maule	Talca	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-49-2016-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-para-las-comunas-de-Talca-y-Maule.pdf
	Maule	
Valle Central de la Provincia de Curicó	Curicó	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/01/PDA-VCPC-tomado-de-razo%CC%81n-por-contralori%CC%81a.pdf
	Teno	
	Rauco	
	Romeral	
	Sagrada de Familia	
Molina		
Chillán y Chillán Viejo	Chillán	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-48-2016-Plan-de-Prevencion-y-Descontaminacion-Atmosferica-para-las-comunas-de-Chillan-y-Chillan-Viejo.pdf
	Chillán Viejo	
Los Ángeles	Los Ángeles	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/DN4-Establece-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-para-la-comuna-de-los-angeles.pdf

Fuente: Documentos oficiales que establecen los PDA.

Continuación Tabla 7.1: Comunas con PDA

Concepción Metropolitano	Lota	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/01/Plan-de-Concepcion%CC%81n-D.O..pdf
	Coronel	
	San Pedro de la Paz	
	Hualqui	
	Chiguayante	
	Concepción	
	Penco	
	Tomé	
Temuco y Padre las Casas	Hualpén	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-8-2015-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-por-MP2-5-para-las-comunas-de-Temuco-y-Padre-las-Casas-actualizacion-del-plan-de-descontaminacion-por-MP10-para-las-mismas-comunas.pdf
	Talcahuano	
Temuco	Temuco	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-8-2015-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-por-MP2-5-para-las-comunas-de-Temuco-y-Padre-las-Casas-actualizacion-del-plan-de-descontaminacion-por-MP10-para-las-mismas-comunas.pdf
	Padre las Casas	
Valdivia	Valdivia	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/DS-25-2017-Plan-de-Descontaminacion-Atmosferica-para-la-comuna-de-Valdivia.pdf
Osorno	Osorno	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/03/DS-47-2016-Establece-plan-de-descontaminacion-atmosferica-para-la-comuna-de-osorno.pdf
Coyhaique y su zona circundante	Coyhaique	https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/DS-7-2019-PDA-para-la-ciudad-de-Coyhaique-y-su-zona-circundante.pdf

Fuente: Documentos oficiales que establecen los PDA.

7.2. Anexo 2. Cantidad de calefactores a leña reemplazados en cada PDA

Tabla 7.2: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA del Valle Central de la Región de O'Higgins

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	57.135		21.732		17.600		8.639		3.127		1.466	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0,05%	0,05%	0,53%	0,53%	38%	38%	0%	0%	40%	40%	44%	44%
40%	0,43%	0,43%	14%	14%	69%	69%	0%	0%	69%	69%	72%	72%
60%	16%	16%	30%	30%	73%	73%	2%	2%	79%	79%	79%	79%
80%	45%	45%	47%	47%	83%	83%	10%	10%	82%	82%	81%	81%
99%	92%	92%	84%	84%	96%	96%	88%	88%	98%	98%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.3: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Talca y Maule

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	19.566		6.219		6.270		3.452		947		133	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	6%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	1%	4%	29%	34%	8%	5%	23%	23%	0%	0%
40%	10%	15%	4%	5%	53%	47%	12%	9%	33%	33%	0%	0%
60%	26%	35%	12%	13%	59%	54%	14%	11%	72%	78%	61%	61%
80%	47%	47%	35%	36%	78%	78%	24%	21%	78%	78%	61%	61%
99%	92%	92%	95%	95%	95%	95%	90%	90%	86%	86%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.4: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA del Valle Central de la Provincia de Curicó

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	28.861		10.654		8.373		4.679		1.636		2.671	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	7%	0%	5%	0%	15%	0%	44%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	1%	0%	4%	10%	26%	7%	1%	20%	22%	73%	48%
40%	3%	15%	6%	12%	36%	41%	7%	9%	38%	28%	92%	50%
60%	19%	34%	15%	22%	49%	52%	21%	23%	47%	48%	95%	72%
80%	48%	48%	31%	32%	71%	72%	37%	32%	66%	66%	98%	98%
99%	98%	98%	94%	94%	99%	99%	91%	91%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.5: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Chillán y Chillán Viejo

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	21.727		9.611		7.851		3.231		886		329	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	1%	1%	31%	44%	0,3%	3%	23%	23%	100%	71%
40%	0,57%	3%	15%	18%	74%	69%	4%	12%	54%	62%	100%	71%
60%	19%	23%	26%	33%	83%	76%	16%	16%	97%	97%	100%	71%
80%	47%	48%	47%	47%	94%	93%	30%	38%	100%	100%	100%	100%
99%	98%	98%	98%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.6: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Los Ángeles

Cantidad actual de equipos	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
	26.716		7.958		6.509		3.773		916		687	
Escenarios	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	5%	0%	30%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	0%	1%	42%	53%	13%	17%	47%	59%	57%	37%
40%	4%	7%	11%	11%	62%	67%	17%	17%	70%	88%	67%	37%
60%	17%	21%	22%	25%	85%	84%	24%	26%	93%	88%	67%	37%
80%	52%	52%	35%	35%	89%	89%	36%	36%	93%	93%	79%	79%
99%	99%	99%	94%	94%	100%	100%	97%	97%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.7: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Concepción

Cantidad actual de equipos	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Escenarios	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
	89.486		33.619		27.144		12.181		6.138		1.851	
Base	0%	0%	0%	0%	0,89%	0%	1,23%	0%	1,15%	0%	3,61%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	1%	1%	22%	26%	3%	1%	36%	35%	20%	16%
40%	5%	7%	6%	6%	53%	52%	6%	7%	56%	55%	40%	42%
60%	22%	22%	12%	12%	74%	74%	12%	11%	79%	79%	73%	73%
80%	54%	54%	29%	29%	89%	89%	27%	26%	89%	90%	89%	89%
99%	93%	93%	89%	89%	99%	99%	91%	91%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.8: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Temuco y Padre las Casas

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	43.940		15.716		15.397		9.072		2.737		1.199	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	7%	0%	3%	0%	16%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0,2%	0,2%	0,5%	2%	28%	38%	5%	6%	37%	29%	40%	51%
40%	0,8%	4%	13%	17%	56%	53%	19%	16%	63%	47%	65%	65%
60%	16%	24%	22%	29%	72%	72%	23%	23%	80%	68%	67%	67%
80%	44%	44%	44%	44%	88%	88%	32%	37%	96%	96%	97%	97%
99%	99%	99%	98%	98%	100%	100%	98%	98%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.9: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Valdivia

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	22.802		10.118		6.647		3.462		1.126		504	
Escenarios	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste	costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0,2%	0%	20%	0%	21%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0,03%	0,03%	1%	4%	48%	46%	8%	13%	57%	37%	51%	78%
40%	0,03%	0,2%	23%	30%	82%	79%	20%	29%	83%	64%	100%	78%
60%	16%	24%	37%	38%	90%	87%	46%	47%	87%	66%	100%	78%
80%	51%	51%	55%	71%	95%	92%	52%	51%	96%	76%	100%	78%
99%	98%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.10: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Osorno

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	28.456		10.970		10.521		4.951		1.340		767	
Escenarios	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	9,14%	0%	1,19%	0%	13,43%	0%	24%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0,11%	0%	2%	47%	55%	4%	11%	74%	76%	71%	75%
40%	0,11%	0,85%	21%	36%	89%	81%	28%	27%	93%	80%	100%	75%
60%	7%	15%	59%	65%	91%	88%	60%	59%	100%	86%	100%	75%
80%	46%	60%	70%	80%	98%	89%	60%	67%	100%	86%	100%	75%
99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.11: Cantidad de calefactor a leña reemplazados para el PDA de Coyhaique y su zona circundante

	Tipo de calefactor a leña actual											
	Con templador		Cocina a leña		Sin templador		Certificado		Salamandra		Chimenea y otros	
Cantidad actual de equipos	9.272		3.710		3.619		1.695		534		148	
Escenarios	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste	Sin costo de ajuste	Con costo de ajuste
Base	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	0%	0%	43%	43%	0%	0%	88%	88%	91%	91%
40%	0%	0%	9%	9%	76%	76%	0%	0%	100%	100%	91%	91%
60%	2%	2%	81%	81%	98%	98%	48%	48%	100%	100%	100%	100%
80%	36%	36%	86%	86%	98%	98%	56%	56%	100%	100%	100%	100%
99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Anexo 3. Imagen y enlace de cada opción de calefacción

Tabla 7.12: Imagen y enlace de cada opción de calefacción

Marca	Modelo	Imagen	Enlace
Toyotomi	KS-23		https://toyotomi.cl/product/estufa-a-kerosene-mecha-ks-23/
Toyotomi	LC-43 DGM		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110002680/Estufa-a-parafina-LC-43-DGM/110002717?exp=sodimac
Fensa	F720+		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110003070/Estufa-a-parafina-F720+/110003158?exp=sodimac
Toyotomi	LC-29		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110002716/Estufa-a-parafina-LC-29/110002748?exp=sodimac

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

Continuación Tabla 7.12 (2): Imagen y enlace de cada opción de calefacción

<p>Corona</p>	<p>Estufa a parafina 6590W 23DKII blanco</p>		<p>https://tienda.estufascorona.cl/producto/estufa-mecha-23-dkii/</p>
<p>Toyotomi</p>	<p>Tiro Forzado 3 kW FF-V30</p>		<p>https://toyotomi.cl/product/estufa-t-forzado-kerosene-ff-v30/</p>
<p>Toyotomi</p>	<p>Tiro Forzado 5,5 kW FF-55</p>		<p>https://toyotomi.cl/product/estufa-t-forzado-kerosene-ff-55/</p>
<p>Mademsa</p>	<p>Estufa a gas 15 kg VITTALE 40</p>		<p>https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110002646/Estufa-a-gas-15-kg-VITTALE-40/110002648?exp=sodimac</p>

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

Continuación Tabla 7.12 (3): Imagen y enlace de cada opción de calefacción

<p>Toyotomi</p>	<p>Estufa a gas 5 kg GH-30 BLUE</p>		<p>https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110004514/Estufa-a-gas-5-kg-GH-30-BLUE/110004515?exp=sodimac</p>
<p>Sumoheat</p>	<p>Estufa a Gas Sumoheat FH-4200 Blue Flame 15 Kg</p>		<p>https://www.falabella.com/falabella-cl/product/11307945/Estufa-a-Gas-Sumoheat-FH-4200-Blue-Flame-15-Kg/11307945?exp=sodimac</p>
<p>Toyotomi</p>	<p>Estufa a gas Blue Flame con ventilador</p>		<p>https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110004250/Estufa-a-gas-Blue-Flame-con-ventilador/110004256?exp=sodimac</p>
<p>Sindelen</p>	<p>Estufa a gas/eléctrica 11 kilos híbrida</p>		<p>https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110020018/Estufa-a-gas-electrica-11-kilos-hibrida/110020019?exp=sodimac</p>

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

Continuación Tabla 7.12 (4): Imagen y enlace de cada opción de calefacción

Toyotomi	Tiro Forzado 3 kW Gas Licuado TF-GH30		https://toyotomi.cl/product/estufa-t-forzado-a-gas-tf-gh30-glp/
Toyotomi	Tiro Forzado 5 kW Gas Licuado TF-GH50		https://toyotomi.cl/product/estufa-a-gas-tiro-forzado-5-kw-gas-licuado-tf-gh50/
Recco	PTC 1.500 W		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110009706/Termoventilador-PTC-1.500-W/110009708?exp=sodimac
Sindelen	Convector EEC-1550		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110003994/Convector-EEC-1550/110003996?exp=sodimac
Atlantic	Calefactor eléctrico 1.000 W 51x65 cm		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110382314/Calefactor-electrico-1.000-W-51x65-cm/110382315?exp=sodimac

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

Continuación Tabla 7.12 (5): Imagen y enlace de cada opción de calefacción

Aiolite	Convector digital 1500 W wifi		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110371741/Convector-digital-1500-W-wifi/110371748?exp=sodimac
Toyotomi	Termoventilador eléctrico 1.800 W		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110009896/Termoventilador-electrico-1.800-W/110009897?exp=sodimac
Samsung	Split Inverter Muro Wifi 9000 BTU/hr		https://www.samsung.com/cl/air-conditioners/wall-mount/ar09tsfzawk-zs/
Samsung	Split Inverter Muro Wifi 12000 BTU/hr		https://www.samsung.com/cl/air-conditioners/wall-mount/ar12tsfzawk-zs/
Midea	Aire Acondicionado Split Inverter Extreme Midea 9.000 BTU		https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110639837/Aire-Acondicionado-Split-Inverter-Extreme-9.000-BTU/110639839?exp=sodimac
Anwo	Aire acondicionado Split Muro 24000 BTU ANWO-N ECO. Clase A. GES24ECO-N		https://www.climaseguro.cl/store/producto-details.asp?prdId=9537&m=1

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

Continuación Tabla 7.12 (6): Imagen y enlace de cada opción de calefacción

Amesti	Italy 8100 Plus Rojo Italiano		https://www.amesti.cl/italy/1114-estufa-a-pellet-italy-8100-plus-rojo-italiano-amesti.html
Bosca	Eco Smart Touch Plus Burdeo		https://www.climatizacion.cl/tienda/producto-details.asp?prdId=12068
Bosca	Mila 6 Charcoal		https://www.bosca.cl/calefaccion-y-climatizacion/calefactores-a-pellet/mila-6
Amesti	Italy 6100		https://www.amesti.cl/italy/1007-italy-6100-rojo-estufa-a-pellet-amesti.html
Yunque	Roma		https://www.falabella.com/falabella-cl/product/15531727/Estufa-Italiana-A-Pellet-Roma/15531727?exp=sodimac

Fuente: Elaboración propia en base a manuales de calefactores.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Industrial
Carrera	: Ingeniería Civil Industrial
Nombre del memorista	: Fernando Emilio Albornoz Montenegro
Título de la memoria	: Evaluación de opciones de calefacción residencial para reducir emisiones al mínimo costo
Fecha de la presentación oral	:
Profesor Guía	: Cristian Mardones Poblete
Profesor Revisor	: Alejandro Andalaft Chacur
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

El presente estudio busca simular el comportamiento de los hogares sobre la elección de calefacción ante diversos escenarios de regulación o políticas a través de un problema de minimización de costos sujeto a restricciones ambientales. Para lograr el objetivo propuesto, se utilizan datos provenientes de la encuesta CASEN 2013.

Primero, se presentan las opciones de calefacción consideradas en este estudio. Luego, se calculan las emisiones de los diversos contaminantes para finalmente, aplicar un modelo de optimización en el software GAMS para encontrar la opción que minimice los costos de recambio para cada hogar, sujeto a metas de reducción de emisiones de material particulado fino (MP_{2,5}).

En cuanto a los resultados, las opciones de calefacción más escogidas son calefactores a pellet y aire acondicionado. Las emisiones de carbono negro se reducen proporcionalmente con las de MP_{2,5}, mientras que las emisiones de CO₂ equivalente presentan reducciones hasta una meta del 80% y luego cuando la meta de reducción es igual a 99%, estas aumentan en relación con el escenario base.

