



Estudio de antecedentes para la revisión de la Norma de Emisión de Material Particulado para los artefactos que combustionen o puedan combustionar Leña y Pellet de Madera

Licitación 608897-43-LE23

Preparado para: Subsecretaría del Medio Ambiente

In-Data Spa

Elaborado por:	Adrián Jara Ernesto Gramsch	Revisado por:	Cristian Yáñez		
Fecha de recepción:	28-12-2023				
Borrador		Preliminar		Definitivo	x
Destinatario:	Jonás Muñoz				



1. Contenido

1.1. Índice de Figuras	7
1.2. Índice de Tablas	11
2. Introducción y contexto del estudio	15
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo general.....	17
3.2. Objetivos específicos	17
3.3. Puntos de las bases técnicas subsanados.....	18
4. Metodología	19
5. Etapa 0: Reunión de inicio y establecimiento de alcances	20
6. Etapa 1: Analizar y comparar la normativa nacional con diferentes normativas y recomendaciones internacionales.	20
6.1. Revisión normas y recomendaciones internacionales	20
6.2. Límites de emisión Unión Europea	21
6.3. Límites de emisión de la norma de la Agencia de Protección Ambiental EPA	23
6.4. Límite de emisión Austria Art. 15a B-VG	26
6.5. Límite de emisión Alemania.....	26
6.6. Límite de emisión norma de Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 4012:2014	27
6.7. Límite de emisión norma de Canadá CSA B415.1:22.....	28
6.8. Límite de emisión etiqueta ecológica de Austria Umweltzeichen 37	29
6.9. Límites de emisión etiqueta de calidad alemana DIN+	31
6.10. Límites de emisión de la etiqueta ecológica Blaue Engel	31
6.11. Límites de emisión de la licencia Nordic Ecolabelled (versión 4)	33
6.12. Límites de emisión del D.S. N°39 del MMA de Chile.....	33
6.13. Descripción unidades de medidas de los límites de emisión.....	34
6.14. Conversión entre unidades de medida de las normas.....	35
6.14.1.1. Conversión de (mg/m ³) a (g/kg).	35
6.14.1.2. Conversión de (g/kg) a (g/h).	36
6.15. Comparativa entre los límites y normas	37
6.15.1. Normas europeas.....	37



6.15.2.	Norma de Estados Unidos.....	38
6.16.	Método de ensayo norma EPA.....	42
6.17.	Método de ensayo norma de la Unión Europea	45
6.18.	Método de ensayo norma Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 4012:2014 y AS/NZS 4013:2014	46
6.19.	Método de ensayo norma de Canadá CSA B415.1:22	46
6.20.	Método de ensayo norma chilena	47
6.21.	Comparativa entre los métodos de ensayo	48
6.22.	Instalación de los equipos	52
6.23.	Instrumentos de gestión ambiental y experiencias internacionales para la reducción de emisiones de contaminación procedentes de la calefacción a leña y sus derivados.....	55
7.	Etapa 2: Caracterizar el mercado nacional de los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de leña y pellet de madera.	56
7.1.	Artefactos a leña y pellet comercializados a nivel nacional	61
7.1.1.	Vida útil de los calefactores.....	65
7.1.2.	Cantidad de equipos certificados	65
7.1.3.	Emisiones de los calefactores certificados	69
8.	Etapa 3: Identificar las mejoras de diseño y las nuevas tecnologías de abatimiento. .	74
8.1.	Estrategias primarias:	74
8.1.1.	Mejoras de diseño para calefacción y cocinas	74
8.2.	Tecnologías de abatimiento.....	81
8.2.1.	Filtros electroestáticos (PES)	81
8.2.2.	Tipos de PESs	82
8.2.3.	Ejemplo de Filtro electrostático en Chile: MPzero.....	84
8.2.1.	Ejemplo filtro electrostático en Suiza: OekoTUBE.....	85
8.3.	Filtros catalíticos	87
8.3.1.	Ejemplo de Filtro catalítico en Chile: RetroCATT.	87
8.3.2.	Ejemplo de Filtro catalítico en Reino Unido: MidCat Puriflue – Clean Air	88
8.4.	Comparación entre filtros.....	89
9.	Etapa 4: Evaluar las emisiones de los artefactos normados y sus efectos	91



9.1.	Efectos en la salud del uso de calefacción a leña y pellet	91
9.2.	Metodología de cálculo de relación entre emisión de contaminantes y su concentración en la atmósfera.	96
9.2.1.	Determinación de las emisiones de contaminantes por uso de calefacción residencial a leña y sus derivados	98
9.2.2.	Determinación de la concentración atmosférica de contaminantes.	100
10.	Análisis de nuevos escenarios normativos.	101
10.1.	Aspectos a considerar en las propuestas de escenarios normativos	101
10.1.1.	Contaminantes a regular	101
10.1.2.	Nuevos parámetros a considerar.....	102
10.1.3.	Unidad de medición a utilizar	103
10.2.	Descripción general de la base para un nuevo protocolo de ensayo	103
10.3.	Aspectos a considerar en las propuestas de escenarios normativos	104
10.4.	Propuestas de escenarios normativos	107
10.4.1.	Antecedentes a considerar en un cambio normativo	110
11.	Evaluación de emisiones y beneficios asociados a las propuestas normativas.	114
11.1.	Estimación de reducción de emisiones por cambios normativos propuestos	114
11.2.	Estimación del cambio de concentración atmosférica de MP _{2,5} por cambios normativos propuestos.....	118
11.3.	Estimación del costo en el cambio de la metodología de ensayo para determinar las emisiones de MP _{2,5}	119
11.4.	Identificar y valorizar los beneficios en salud (mortalidad y morbilidad) por los escenarios normativos propuestos.....	120
11.4.1.	Identificación de los beneficios	120
11.5.	Valoración económica de la disminución de emisiones	122
11.5.1.	Valores de los coeficientes de riesgo unitario	124
11.5.2.	Valores de Tasas De Incidencia Base	124
11.5.3.	Población expuesta	125
11.5.4.	Valores unitarios de beneficios.....	126
11.5.5.	Resultados de la estimación de costos y beneficios asociados a los cambios normativos propuesto.....	126
11.6.	Costos asociados a la actualización de la norma	132



12.	Conclusiones.....	134
12.1.	Etapa 1.....	134
12.1.	Etapa 2.....	135
12.1.	Etapa 3.....	136
12.1.	Etapa 4.....	137
12.1.	Etapa 5.....	137
12.1.	Etapa 6.....	139
13.	ANEXOS.....	141
14.1.	Protocolo de medición establecido por la EPA.....	141
14.1.1.	Protocolo para el suministro de combustible.....	145
14.1.2.	Protocolo para el suministro de pellet.....	149
14.2.	Protocolo de medición establecido por la Unión Europea.....	151
14.2.1.	Medición del material particulado MP.....	154
14.2.2.	Medición de óxidos de nitrógeno (NO _x).....	157
14.3.	Detalle de experiencias internacionales.....	159
14.3.1.	Experiencias en Europa.....	159
14.3.2.	Experiencias en Estados Unidos.....	163
14.3.3.	Experiencias en el recambio de calefactores de países del extranjero....	171
14.4.	Chimeneas y cocinas comercializadas en el mercado nacional.....	177
14.5.	Mantenciones que se deben realizar a los calefactores.....	180
14.5.1.	Estufas a leña.....	180
14.5.2.	Estufas a pellet.....	181
14.6.	Importaciones de artefactos a leña y pellet.....	183
14.6.1.	Importaciones de estufas a pellet.....	184
14.6.2.	Importaciones de equipos a leña.....	186
14.7.	Entrevistas actores claves.....	187
14.7.1.	Entrevista Amesti.....	187
14.7.2.	Entrevista Alcázar.....	188
14.7.3.	Entrevista Cosmoplas.....	189
14.7.4.	Entrevista Toyotomi.....	190



14.7.5.	Entrevista Cesmec.....	191
14.7.6.	Principales observaciones de las entrevistas.....	192
14.8.	Desafíos del mercado de calefactores a leña y pellets	193
14.9.	Mejora de diseño para Reducir la Emisión de Partículas en Cocinas a leña utilizadas en Araucanía, Chile.	196
14.10.	Proyección de la calidad de aire por adición de tecnologías.	197
14.11.	Estimación de costos por aplicación de medidas de abatimiento de emisiones. 200	
14.12.	Beneficios en evaluaciones internacionales	203
14.12.1.	Resultados Colombia	203
14.12.2.	Resultados Unión Europea y Reino Unido	205
14.12.3.	Resultados Estados Unidos	211
14.12.4.	Resultados Nueva Zelanda.....	213
14.12.5.	Resultados Chile.....	215

1.1. Índice de Figuras

Figura 1, Secuencia metodológica propuesta	19
Figura 2, Diferencia en estufas con una doble combustión, donde en a) se observa un equipo donde solo hay una interacción con aire en la combustión b) se observa la entrada de aire precalentado a la cámara de quema, para completar la combustión de partículas.	21
Figura 3. Normas de emisión de estufas pequeñas homologadas a (g/h).	42
Figura 4, Imagen de una disposición de cordwood y cribwood para mediciones en estufas a leña.	43
Figura 5, Comparison of Sampling and Ambient Conditions (Nussbaumer , 2008).	51
Figura 6, diagrama de instalación con parad de protección.	53
Figura 7, Diagrama de conexión de la chimenea o cañón, a la izquierda una instalación con conexión de chimenea que atraviesa la pared y a la derecha una instalación con conexión directa que atraviesa el techo.	54
Figura 8, Cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para cocinar.	56
Figura 9, Cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para la calefacción.	57
Figura 10, Distribución de uso de artefactos a leña a nivel nacional en el sector residencial. Fuente: CDT, 2015.	59
Figura 11, Evolución de la cantidad de calefactores a leña y pellet certificados, para los últimos cinco años.	65
Figura 12, Evolución de la cantidad de calefactores a leña certificados, para los últimos cinco años.	66
Figura 13, Evolución de la cantidad de calefactores a pellet certificados, para los últimos cinco años.	66
Figura 14, Distribución de la cantidad de calefactores a leña certificados por empresa. ...	67
Figura 15, Distribución de la cantidad de calefactores a pellet certificados por empresa. .	67
Figura 16, Distribución de los calefactores certificados en los últimos cinco años, por rango de potencias establecido en la normativa.....	68
Figura 17, Cantidad de equipos a leña y pellet certificado en los últimos cinco años, por rango de potencia.....	68
Figura 18, Gráfico de emisiones de los calefactores a leña por modelo vs potencia térmica.	69
Figura 19, Gráfico de emisiones de los calefactores a pellet por modelo vs potencia térmica.	70
Figura 20, Fotos de estufas a leña, a la izquierda el modelo 350 marca Amesti y a la derecha el modelo Limit 380 marca Bosca.....	70
Figura 21, Distribución de calefactores por emisión de material particulado, para el rango de potencias de hasta 8kW.	71

Figura 22, Distribución de calefactores por emisión de material particulado, para el rango de potencias de entre 8kW y 14kW.	72
Figura 23, Relación entre el precio de los calefactores a leña y su potencia térmica.	72
Figura 24, Relación entre el precio de los calefactores a leña y sus emisiones (para equipos dentro de un rango de potencias similares).....	73
Figura 25, Fotos de termoestufas a pellet, a la izquierda el modelo Hidro de 20 kW marca Khöne y a la derecha el modelo termoestufa Hidro 26 de 25,8 kW marca Bosca.	73
Figura 26, Diferencia en estufas con una doble combustión, donde en a) se observa un equipo donde solo hay una interacción con aire en la combustión b) se observa la entrada de aire precalentado a la cámara de quema, para completar la combustión de partículas.	75
Figura 27, Estufas que cumplen con el requisito de doble cámara de Ecodesing. Los números de 1 al 4 son corrientes de aire, donde 1 es aire primario, 2 es aire de la ventana, 3 aire secundario y 4 aire piloto, el cual actúa como aire primario, pero solo se utiliza durante el encendido. Adaptación de IEA Bioenergy del estudio danés de 2017, “LowCarbon Brændkammer - MUDP 1946”	77
Figura 28, Ejemplo de los tres deflectores en la zona postcombustión, rescatada de “LowCarbon Brændkammer”.	77
Figura 29, Series temporales de la temperatura de los gases de combustión CO y O ₂ de forma cualitativa sin y con control automático.	79
Figura 30, vista desde arriba, sistema simplificado del funcionamiento del Precipitador electrostático y abajo un diseño de Precipitador electrostático	81
Figura 31, Infografía de los efectos en la reducción de emisiones y eficiencia del uso de filtros electroestáticos. Fuente MPZero.	85
Figura 32. Filtro Electrostatico OekoTube- Inside a la izquierda y OekoTube-Outside a la derecha. Fuente: OekoSolve AG.....	86
Figura 33, Filtro catalítico RetroCATT, Fuente: Purexhaust.	87
Figura 34, Filtro catalítico MidCat Puriflue- Clean Air. Fuente:Chimeneycowl.....	88
Figura 35. Porcentaje de casos de enfermedades respiratorias reportados en el municipio. Fuente: E.S.E Centro de salud Santa Sofía, 2015.....	94
Figura 36, Mediciones promedio de la calidad del aire en el interior del hogar a lo largo del día-Talca. En rojo hogares con estufa a leña, en azul los hogares con estufa a pellets.....	95
Figura 37. Comparación de emisiones de MP ₁₀ para distintos escenarios normativos. Donde, inicio frío “cold start” (CS), fuego después de arranque en frío “flaming following cold start” (CSF), ardiendo después de arranque frío “smoldering following cold start” (CSS), arranque en caliente “warm start” (WS), en llamas después de arranque en caliente “flaming following warm start” (WSF), en llamas después de un arranque caliente “smoldering following warm start” (WSS), fuego apagado “burnout” (BO).	106

Figura 38. Normas internacionales de emisión de estufas pequeñas homologadas a (g/h)	110
Figura 39. Ingresos per cápita de países del mundo ordenados de mayor a menor. Chile está en el puesto N° 63.	111
Figura 40. Países que cuentan con normativa de control de emisiones, ordenados por ingreso per cápita.	112
Figura 41, Emisiones para el Escenario 4, con efectos de la informalidad.	114
Figura 42, Proyección del parque de calefactores en base a la entrada de nuevos equipos de calefacción. Elaboración propia.	115
Figura 43, Estimación de las emisiones de MP _{2,5} en base a cambios normativos	116
Figura 44. Principales efectos debido a la exposición a material particulado MP _{2,5}	120
Figura 45. Factores utilizados para determinar cambios en el número de efectos por exposición a MP _{2,5}	123
Figura 46, Diagrama del tren de medición de MP. Fuente: E2515-11(2017) “Standard Test Method for Determination of Particulate Matter Emissions Collected by a Dilution Tunnel”	141
Figura 47, Diagrama de la disposición de filtros. Fuente: E2515-11(2017) “Standard Test Method for Determination of Particulate Matter Emissions Collected by a Dilution Tunnel”	142
Figura 48, Diagrama del túnel de dilución.....	142
Figura 49, Imagen de una disposición de cordwood y cribwood para mediciones en estufas a leña.	146
Figura 50, Diagrama de las dimensiones establecidas para la disposición de cribwood. Fuente: E2780-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters”	146
Figura 51, Diagrama de las dimensiones establecidas para la disposición cordwood. Fuente: E2780-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters”	147
Figura 52, Diagrama de la instalación del sistema de triedro. Fuente: EN16510-1 “Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods”	152
Figura 53, Diagrama de instalación del sistema, a) para chimenea con salida superior y b) con chimenea con salida posterior.Fuente: Fuente: EN16510-1 “Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods”	153
Figura 54, Fotos de chimeneas empotradas, a la izquierda modelo Inserto 800 Palladio marca Amesti y a la derecha modelo MONT BLANC marca Alcazar.	177
Figura 55, Fotos de cocina a leña, a la izquierda el modelo 80 tradicional marca Yunque y a la derecha el modelo S800 marca Alcázar.....	179
Figura 56, Distribución del país de origen de las estufas a pellet importadas en los últimos cinco años.	185

Figura 57, Evolución de las importaciones de estufas a pellet, en los últimos cinco años.	186
Figura 58, Distribución del país de origen de las cocinas a leña importadas en los últimos cinco años.	186
Figura 59. Producción nacional de pellets e importación de calefactores a pellets. Fuente: elaboración propia a base de datos del registro de importaciones y de AChBiom.	194
Figura 60, Diagrama de las modificaciones realizadas a las cocinas a leña en el estudio. Fuente: Betancourt Astete, R.; Gutiérrez-Cáceres, N.; Muñoz-Catalán, M.; Mora-Chandía, T. Direct Improvement in the Combustion Chamber and the Radiant Surface to Reduce the Emission of Particles in Biomass Cooking Stoves Used in Araucanía, Chile. Sustainability 2021, 13, 7205	197
Figura 61, Cambio en las emisiones de MP _{2,5} en toneladas por año, a 10 años para los calefactores que aplica la medida, bajo escenarios de mayor penetración.	200
Figura 62 Costos sociales totales relacionados con la salud debido a la contaminación exterior diferenciados por combinación de técnicas y combustibles. Fuente: Health-related social costs of air pollution due to residential heating and cooking In the EU27 and UK (Delf, CE Delft. Mayo 2022).....	206
Figura 63, Impacto relativo de los escenarios sobre la morbilidad en la UE-27 causada por la exposición a la contaminación del aire a niveles superiores a las directrices AQ de la OMS para 2030 (izquierda) y 2050 (derecha). Las distintas barras corresponden a los diversos resultados de morbilidad considerados en el análisis principal del estudio.....	208
Figura 64. Impacto relativo de los escenarios en el número de muertes prematuras anuales en la UE-27 causadas por la exposición a la contaminación del aire a niveles superiores a las directrices AQ de la OMS para tres contaminantes (PM _{2,5} , arriba a la izquierda, O ₃ , arriba a la derecha, NO ₂ , abajo).	209
Figura 65, Estimaciones de costos y beneficios directos por efecto proyectados a 2020. (En miles de millones de dólares del año 2006).....	212
Figura 66. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C (Miles de millones de dólares)	218
Figura 67. Distribución de beneficios y costos del PPDA	218
Figura 68. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C en miles de millones de dólares (a la izquierda) y Resumen de los costos y beneficios de la medida para Chillán y Chillán Viejo.	219
Figura 69. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C en miles de millones de dólares (a la izquierda) y Resumen de los costos y beneficios del anteproyecto PPDA MP10 en Talca y Maule.....	219

1.2. Índice de Tablas

Tabla 1, Límites de emisión de MP (g/h) para los calefactores nuevos que combustonan o pueden combustonar leña o pellet de madera de acuerdo con su potencia térmica (kw).	16
Tabla 2, Resumen de los puntos de las bases técnicas, con el punto del documento donde está desarrollado.	18
Tabla 3, Tabla resumen de parámetros de eficiencia energética y emisiones del Ecodesign 2022.	23
Tabla 4, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la EPA de Estados Unidos.	25
Tabla 5, Tabla resumen de los parámetros establecidos en el Art.15a B-VG de Austria.	26
Tabla 6, Tabla resumen de los parámetros establecidos por las autoridades de Alemania.	27
Tabla 7, Límites de emisión y parámetros establecidos.	27
Tabla 8, Límites de emisión norma de Canadá CSA B415.1:22.	28
Tabla 9, Tabla resumen de los parámetros establecidos en etiqueta ecológica Umweltzeichen 37 de Austria.	29
Tabla 10, Empresas que cuentan con la etiqueta Umweltzeichen 37.	29
Tabla 11, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la etiqueta DIN+.	31
Tabla 12, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la etiqueta Blaue Engel.	32
Tabla 13, Empresas y equipos que cuentan con la etiqueta Blaue Engel.	32
Tabla 14, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la licencia Nordic Ecolabelled.	33
Tabla 15, Límites de emisión de MP (g/h) para los calefactores nuevos que combustonan o pueden combustonar leña o pellet de madera de acuerdo con su potencia térmica (kW).	33
Tabla 16. Tasas de quemado para distintos tipos de artefactos a leña. (fuente: estudio CDT).	37
Tabla 17, Ventajas y desventajas de normas o etiquetas voluntarias.	40
Tabla 18. Normas de emisiones para estufas pequeñas de carga frontal y homologación entre normas.	41
Tabla 19, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de la EPA E2780-10(2017).	44
Tabla 20, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a pellet, de tres configuraciones de potencia, de la norma de la EPA E2779-10(2017).	44
Tabla 21, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a pellet, de dos configuraciones de potencia, de la norma de la EPA E2779-10(2017).	44
Tabla 22, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de Canadá CSA B415.1:22.	47



Tabla 23, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de Chile según el método CH-28.	48
Tabla 24, Ventajas y desventajas del método de ensayo.	51
Tabla 25, Detalle de la cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para cocinar y calefaccionar y el porcentaje que representan respecto al total de viviendas de la región.	58
Tabla 26, Uso de artefacto a leña por región en el sector residencial. Fuente: CDT, 2015.	59
Tabla 27, Uso de artefacto a leña por región en el sector residencial. Fuente: SISTAM, 2017.	60
Tabla 28, detalle de las horas de uso promedio de la calefacción a leña y los kg promedio de leña utilizados en el año 2015. Fuente: CDT, 2015.	61
Tabla 29, Resumen características de los principales equipos a leña certificados comercializados en Chile.	62
Tabla 30, Resumen características de los equipos a pellet certificados comercializados en Chile.	63
Tabla 31, Análisis de las emisiones ponderadas de los calefactores certificados.	71
Tabla 32, Diagrama que indica la reducción de emisiones por parte de la tecnología de filtros electroestáticos de MPZero.	85
Tabla 33, Comparativa de los tipos de filtros utilizados para eliminar MP de la combustión.	89
Tabla 34, Efectos respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña	92
Tabla 35 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña	92
Tabla 36 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña	92
Tabla 37 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña	93
Tabla 38, Factores de emisión para material particulado y varios gases para estufas a leña.	99
Tabla 39, Distribución de los contaminantes en la atmósfera, según zona del país.	100
Tabla 40, Reducción de las emisiones de los calefactores nuevos, en base a los escenarios normativos propuestos.	115
Tabla 41, Resultados del cálculo de emisiones de MP _{2,5} en los escenarios normativos. ..	116
Tabla 42, Resumen de los resultados de emisiones de MP _{2,5} por la aplicación de escenarios normativos.	117
Tabla 43, Resultados del cálculo de emisiones de MP _{2,5} en los escenarios normativos con efectos de informalidad.	117
Tabla 44. Coeficientes de riesgo unitario para MP _{2,5}	124
Tabla 45. Tasas de mortalidad, morbilidad [eventos/1.000 habitantes]. Detalle Nacional. Fuente: DICTUC (2020).	125
Tabla 46. Valoración unitaria de cada efecto evaluado [UF/caso].	126



Tabla 47. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP _{2,5} para el Escenario 1.	127
Tabla 48. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP _{2,5} del Escenario 1 (Valores en UF).	127
Tabla 49. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP _{2,5} para el Escenario 2.	128
Tabla 50. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP _{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).	128
Tabla 51. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP _{2,5} para el Escenario 2.	129
Tabla 52. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP _{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).	130
Tabla 53. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP _{2,5} para el Escenario 2.	130
Tabla 54. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP _{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).	131
Tabla 55. Disminución de casos en efectos totales en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP _{2,5} en los tres casos propuestos.	131
Tabla 56. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP _{2,5} en los cuatro escenarios propuestos. (Valores en UF).	132
Tabla 57, Especificaciones de la leña a utilizar en el método de ensayo de la EPA.	147
Tabla 58, Resumen de las medidas nuevas propuestas de CCVC y estimaciones de reducciones de Emisiones (MMTCO _{2e}) para carbono negro (antropogénico).	164
Tabla 59, Listado de Chimeneas levantado, con el detalle de potencia y eficiencia.	177
Tabla 60, Listado de cocinas a leña levantado, con el detalle de potencia y eficiencia....	178
Tabla 61, Porcentaje de reducción de emisiones por tipo de calefactor con la aplicación de filtros electrostáticos.	198
Tabla 62, Porcentaje de penetración a 10 años de la implementación de filtros electrostáticos, por zona del país.	198
Tabla 63, Reducción de emisiones por efecto de aplicar la medida de filtros electrostáticos, en distintos escenarios de penetración.	198
Tabla 64, Emisiones de contaminantes a 10 años, en base a implementación de filtros electrostáticos.	199
Tabla 65, Cantidad de equipos con aplicación de filtros electrostático, en cada escenario de penetración de la medida.	201
Tabla 66, Costos de inversión y mantención en CLP de la aplicación de filtros electrostáticos, en cada escenario de penetración de la medida.	201
Tabla 67, Costos de inversión y mantención en UF de la aplicación de filtros electrostáticos, en cada escenario de penetración de la medida.	202



Tabla 68, Costo total de la implementación de filtros electroestáticos en cada escenario de penetración de la medida.....	202
Tabla 69, Resultados del cálculo de costos de implementación sobre emisiones de MP2,5 abatidas.	203
Tabla 70, Parámetros empleados para el estudio en Colombia	204
Tabla 71. Localidades más beneficiadas en muertes evitables (*en miles de millones de pesos y VPN 2011)	204
Tabla 72 Localidades más beneficiadas en reducción de servicios hospitalarios (*en millones de pesos y VPN 2011)	204
Tabla 73 Costos sociales totales relacionados con la salud de la contaminación del aire exterior debido a calefacción y cocinas domesticas (2018).....	205
Tabla 74 Costo social promedio relacionado con la salud de las combinaciones técnica-combustible para calefacción en la UE27 y el Reino Unido (2018).....	207
Tabla 75 Costos y beneficios (valores netos) para la sociedad (valorización de los impactos en la salud, tanto mortalidad como morbilidad) por año (en miles de millones de euros a precios de 2015, UE27).....	209
Tabla 76 Resultados de los efectos de la salud asociadas a MP2,5 y Ozono, para ambos escenarios.	211
Tabla 77 Efectos sobre la salud y costo por efecto.	214
Tabla 78 Costos y beneficios es una representación gráfica.....	214
Tabla 79 Ahorro regional neto en costos de salud en la proyección 2017 – 2028 en millones de dólares neozelandeses	214
Tabla 80 Valores unitarios por casos evitados en UF/caso (valor UF de diciembre 2013).216	
Tabla 81 Resultados del análisis costo-beneficio y costo-efectividad (en Millones de pesos chilenos).....	216
Tabla 82 Costos asociados a la salud.....	217
Tabla 83 Beneficios y costos de las principales medidas del plan.	219

2. Introducción y contexto del estudio

La contaminación atmosférica abarca todas aquellas sustancias cuya concentración resulta perjudicial tanto para la salud humana como para el entorno. Como respuesta a esta problemática, surgen las normas de emisión, definidas en el artículo 4 del Decreto Supremo N°38 del año 2012 del Ministerio del Medio Ambiente. Este decreto, titulado "Aprueba Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión," establece que las normas de emisión son aquellas que fijan la cantidad máxima permitida de un contaminante en el efluente proveniente de la fuente emisora. Estas normas se convierten en instrumentos de gestión cuya aplicabilidad, según el artículo 33, se orienta hacia la prevención de la contaminación y sus efectos, o hacia el mantenimiento y recuperación de la calidad ambiental en un territorio específico, integrándose en un Plan de Descontaminación y/o de Prevención, según corresponda.

El material particulado (MP) se presenta como uno de los contaminantes atmosféricos, compuesto por partículas líquidas o sólidas en suspensión. Su clasificación según el diámetro aerodinámico incluye las partículas MP10 y MP2,5, con diámetros menores a 10 μm y 2,5 μm , respectivamente. La composición química del MP varía en función de sus fuentes de emisión, que pueden ser naturales o antropogénicas, como la calefacción domiciliar, el tráfico vehicular, y las actividades industriales.

La exposición a concentraciones elevadas de MP2,5 se vincula a efectos adversos en la salud, manifestándose tanto de manera crónica como aguda. Entre los impactos identificados se encuentran el aumento de la mortalidad prematura, mayores ingresos hospitalarios en pacientes con enfermedades pulmonares y cardiovasculares, exacerbación de los síntomas y agravamiento del asma, incremento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación pulmonar y sistémica, disfunciones endoteliales y vasculares, desarrollo de aterosclerosis, así como un aumento en la incidencia de infecciones y cáncer respiratorio, entre otros.

En la zona centro-sur del país, la quema de combustibles sólidos, principalmente relacionada con la preparación de alimentos y la calefacción residencial, se erige como una de las principales fuentes de emisión de material particulado. Este fenómeno, impulsado por su uso masivo durante los meses fríos debido a su bajo costo, alto poder calorífico y arraigo cultural, genera emisiones mayoritariamente compuestas por MP2,5 (>90%), superando los límites establecidos por la normativa nacional. Actualmente, existen 11 planes de descontaminación vigentes y otros en proceso de elaboración para abordar esta problemática. Por ende, resulta imperativo actuar de manera preventiva y, de ser posible, correctiva en el uso de artefactos de calefacción que emplean combustibles sólidos.

En este contexto, el Decreto Supremo N°39 del año 2011, revisado por el Decreto Supremo N°46 del año 2013, ambos del Ministerio del Medio Ambiente, establece la "Norma de Emisiones de Material Particulado para los Artefactos que Combustionen o Puedan Combustionar Leña y Pellet de Madera" (en adelante: Norma de Calefactores). Este reglamento tiene como objetivo salvaguardar la salud de las personas mediante la imposición de límites de emisión de material particulado, aplicables a los artefactos nuevos que utilicen leña o pellet de madera y tengan capacidad para combustionarlos.

La norma de calefactores se aplica a artefactos nuevos con una potencia térmica nominal menor o igual a 25kW, en todo el territorio nacional a excepción de aquellas zonas declaradas latentes o saturadas donde rija un plan de prevención y/o descontaminación atmosférica con medidas diferentes. Los límites de emisión de material particulado se dividen en tres rangos relacionados a su potencia térmica, tal como se muestra en la tabla:

Tabla 1, Límites de emisión de MP (g/h) para los calefactores nuevos que combustionan o pueden combustionar leña o pellet de madera de acuerdo con su potencia térmica (kw).

Potencia térmica nominal (kW)	Emisión de MP (g/h)
Menor o igual a 8	2,5
Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5
Mayor a 14 y menor o igual a 25	4,5

La fiscalización y control de la Norma de Calefactores se encuentran a cargo de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), la cual establece protocolos de análisis y/o ensayos de emisiones de material particulado de productos de leña y otros dendroenergéticos para los calefactores a leña (PC200/2) y pellet (PC 201/2). Dichos protocolos se basan a lo establecido en el artículo 6 de la Norma de Calefactores, el cual hace referencia al método 5G y al método CH-28.

Los artefactos nuevos para comercializar deberán contar con un etiquetado que certifique el cumplimiento de los estándares mínimos de eficiencia energética y de emisión, lo cual se concreta mediante la resolución exenta N°47 del año 2014, del Ministerio de Energía, "Establece etiqueta de consumo energético de calefactores a leña" y la resolución exenta N°21 del año 2016, del Ministerio de energía. "Establece etiqueta de consumo energético de calefactores a pellets de madera" para los artefactos a leña y pellets, respectivamente.

El artículo 38 del Reglamento de normas, establece que: "... toda norma de calidad ambiental y de emisión será revisada, según los criterios establecidos en este título, a lo menos cada cinco años...", debido a esto, se iniciará un nuevo proceso de revisión, motivo por el cual, es preciso actualizar la información disponible, ya que se buscará establecer

estándares más estrictos y acordes a la realidad chilena, pero siguiendo la tendencia internacional y recomendación científica.

Con este estudio se busca proveer con antecedentes que fundamenten la revisión del Decreto Supremo N°39, de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente que establece "Norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de leña y pellet de madera", mediante una evaluación técnica, económica y científica junto a una evaluación social de los costos-beneficios, considerando al menos tres opciones de escenarios regulatorios.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Proveer antecedentes mediante una evaluación técnica, económica, social y científica al proceso de revisión del Decreto Supremo N°39 de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente, que establece "Norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de leña y pellet de madera", considerando los beneficios y desafíos asociados a diferentes escenarios regulatorios.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar y comparar la normativa nacional con diferentes normativas y recomendaciones internacionales.
- Identificar y caracterizar el mercado nacional de los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de leña y pellet de madera.
- Identificar las mejoras de diseño y las nuevas tecnologías de abatimiento.
- Evaluar las emisiones de los artefactos normados y sus efectos en la salud.
- Proponer y justificar nuevos escenarios normativos.
- Evaluar costos y beneficios asociados a la aplicación de las propuestas normativas.

3.3. Puntos de las bases técnicas subsanados

A modo de resumen, se indican a continuación los puntos del documento que dan cumplimiento con los puntos de las bases.

Tabla 2, Resumen de los puntos de las bases técnicas, con el punto del documento donde está desarrollado.

Punto de las bases	Punto del documento	Página del documento
3.1 Objetivo a)	6. Etapa 1.	
3.1.1	6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.15	20, 21, 23, 26, 26, 27, 29, 31, 31, 33, 33
3.1.2	6.13, 6.15, 6.15.1, 6.15.2, 6.14, 6.14.1.1,	34, 37, 38, 35
3.1.3	6.23, 14.3.1, 14.3.2, 14.3.3	55, 159, 163, 171
3.1.4	0, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22	38, 45, 46, 46, 47, 48, 52
3.2 Objetivo b)	7. Etapa 2.	
3.2.1	7.1, 7.1.2, 7.1.3	61, 65, 69
3.2.2	14.6, 14.6.1, 14.6.2, 14.7, 14.7.1, 14.7.2, 14.7.3, 14.7.4, 14.7.6	183, 184, 186, 187, 187, 188, 189, 190, 192
3.2.3	7.1, 7.1.1, 0, 14.5.1, 14.5.2	61, 65, 74, 180, 181
3.2.4	14.7, 14.7.1, 14.7.2, 14.7.3, 14.7.4, 14.7.6, 14.8	187, 187, 188, 189, 190, 192, 193
3.3 Objetivo c)	8. Etapa 3.	
3.3.1	8.1, 8.1.1, 14.9	74, 74, 196
3.3.2	8.2, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.2.1, 8.3, 8.3.1, 8.3.2, 8.4	81, 81, 82, 84, 85, 87,
3.3.3	8.4	87
3.3.4	8.4	87
3.1 Objetivo d)	6. Etapa 4.	
3.4.1	9.1	91
3.4.2	9.1	91
3.4.3	9.2	96
3.4.4	9.2.1, 9.2.2, 14.10, 14.11.	98, 100, 197, 200
3.2 Objetivo e)	7. Etapa 5.	
3.5.1	10, 10.1.1, 10.1.2	101, 101, 102
3.5.2	10.1.3	103
3.5.3	10.3, 10.4, 10.4.1	104, 107, 110
3.5.4	10.2	103
3.3 Objetivo f)	8. Etapa 6.	
3.6.1	11.1, 0	114, 117
3.6.2	14.11	200
3.6.3	11.3	119
3.6.4	11.4, 11.4.1, 11.5, 11.5.1, 11.5.4, 11.5.5	120, 120, 122, 124, 124, 125, 126, 126
3.6.5	14.12, 14.12.1, 14.12.2, 14.12.3, 14.12.4, 14.12.5	203, 203, 205, 211, 213, 215

4. Metodología

A continuación, se presenta el esquema de abordaje del proyecto:

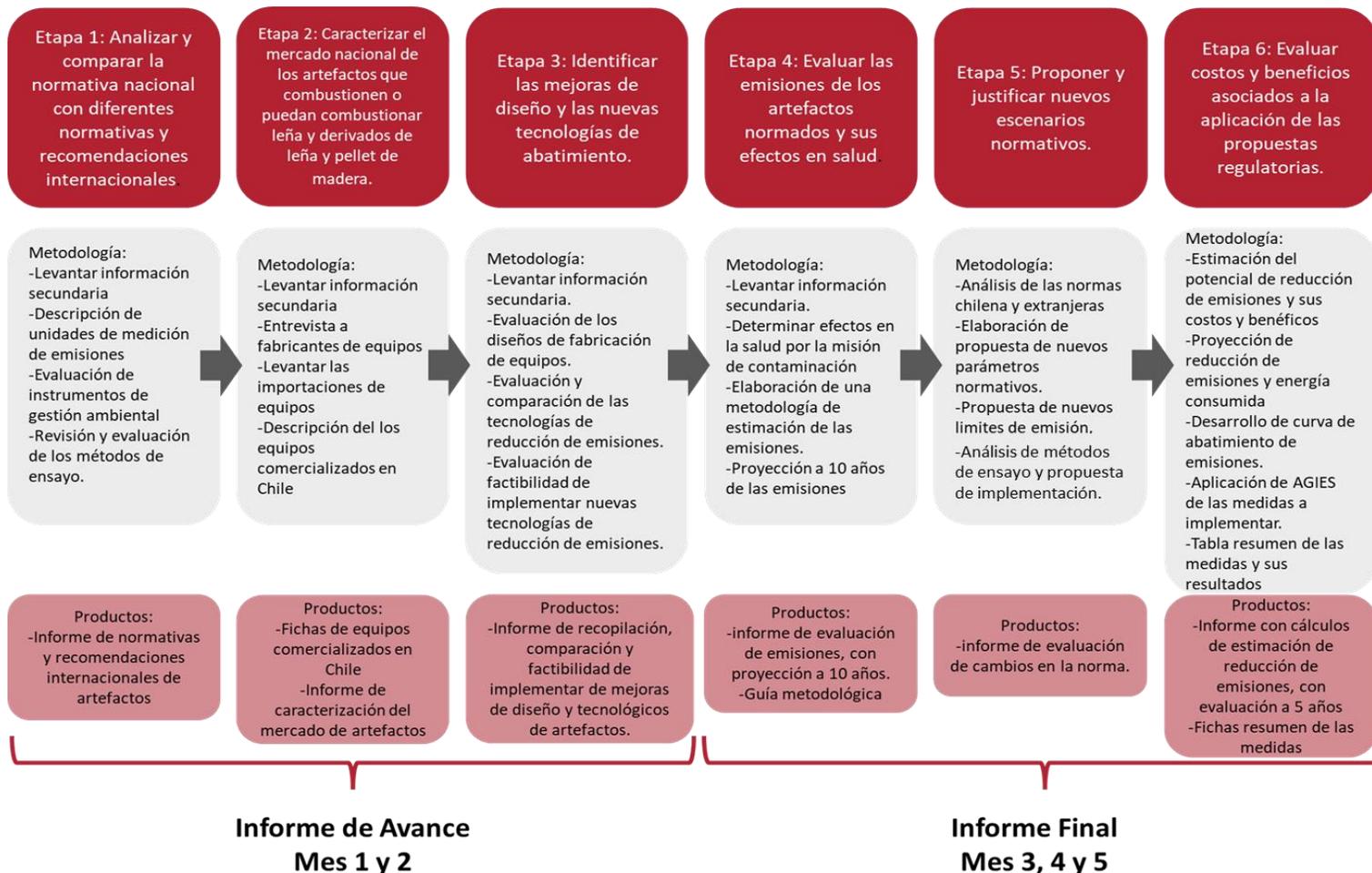


Figura 1, Secuencia metodológica propuesta

5. Etapa 0: Reunión de inicio y establecimiento de alcances

Para dar inicio al proyecto se realizó una reunión con la contraparte técnica en la que se comentó el contexto del estudio solicitado, donde se estableció la problemática y formas de solucionarla.

En esta también se expuso por parte de la contraparte técnica algunos alcances esperados y temas que son de interés de revisar en este estudio, como:

- Diferencias entre las emisiones de laboratorio y las reales en hogares.
- El problema de la actual norma es que regula hasta equipos de 25 kW de potencia, generando un vacío de equipos que no deben ser certificados.
- La problemática de los equipos a leña/pellet ya instalados y levantar formas de reducir las emisiones de estos.
- La situación de las cocinas a leña es que actualmente son artefactos no normados, lo que permite su comercialización sin certificación y medición de emisiones.

6. Etapa 1: Analizar y comparar la normativa nacional con diferentes normativas y recomendaciones internacionales.

6.1. Revisión normas y recomendaciones internacionales

En este capítulo del estudio, se sistematiza la información recabada de las normativas internacionales, respecto a las emisiones de equipos que combustonan o pueden combustonar leña o pellet de madera.

Para cumplir con el objetivo, se revisaron normativas de emisiones de equipos de calefacción a leña y/o pellet, para los países de Europa (Alemania, Austria, Bélgica, España, Francia, Italia, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa y Suecia)¹ que están establecidas en las directrices del programa Ecodesign, normativas nacionales propias de Austria y Alemania, las normas de norte América indicadas por la Agencia de Protección Ambiental o EPA por sus siglas en inglés para Estados Unidos y Canadá y la norma para Australia y Nueva Zelanda. Sumado a esto, se sistematizaron los límites establecidos en etiquetas voluntarias a las que pueden acceder estos equipos, los cuales son más exigentes

¹ https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en

que las normas por las que se rigen en cada país, esto con el fin de poder comercializar equipos que sobresalgan del resto en términos ambientales.

6.2. Límites de emisión Unión Europea

En la Unión Europea (EU) los equipos que combustionan combustibles sólidos se rigen por lo indicado en el programa Ecodesign 2022, en específico la regulación EU 2015/1185², que establece estándares de calidad a los equipos fabricados en torno a la eficiencia energética y las emisiones de contaminantes. Los principales puntos que abarca esta regulación son los siguientes:

- Incluye equipos de calefacción que utilizan combustibles sólidos, al igual que los equipos de calefacción indirecto por fluidos.
- El consumo de energía y las emisiones de los calefactores a combustible sólido puede reducirse mediante la aplicación de tecnologías no patentadas existentes (enfocado a mejoras desde el diseño del equipo, como la geometría de la cámara de combustión, entradas de aire secundarias, entre otras) sin un aumento de los costos combinados de compra y operación de estos productos, como adicionar un sistema de doble cámara de combustión (Figura 2).

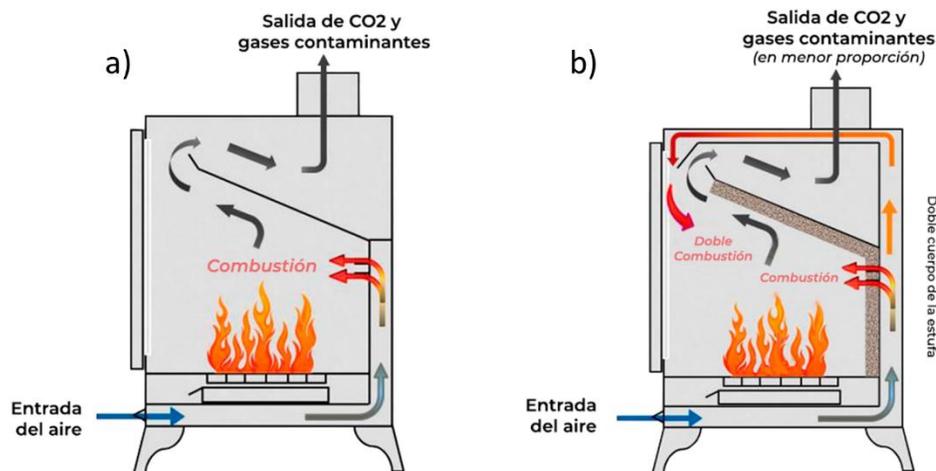


Figura 2, Diferencia en estufas con una doble combustión, donde en a) se observa un equipo donde solo hay una interacción con aire en la combustión b) se observa la entrada de aire precalentado a la cámara de quema, para completar la combustión de partículas.

² Fuente: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32015R1185>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1185>

- En conjunto, se espera que los requisitos de Ecodesign establecidos en reglamento 2015/1185 den como resultado, para 2030, un ahorro energético anual estimado de aproximadamente 41 PJ correspondientes a 0,4 t de CO₂.
- Con los requisitos establecidos en el reglamento 2015/1185 se pretende lograr una disminución de material particulado (MP), compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) de 27 kt/año, 5 kt/año y 399 kt/año respectivamente para 2030.
- Este reglamento cubre productos con diferentes características técnicas, como estufas convencionales, cocinas, chimeneas, entre otros, que, por sus diseños y características, no permiten establecer los mismos requisitos de eficiencia, provocando que ciertas tecnologías quedaran prohibidas en el mercado, lo que tendría un impacto negativo para los consumidores. Por esto se establecen requerimientos específicos para cada tipo de artefacto.
- Los requerimientos del Ecodesign no deberían afectar la funcionalidad o la asequibilidad de los equipos de calefacción de combustible sólido desde la perspectiva del usuario final y no deberían afectar negativamente a la salud, la seguridad o el medio ambiente.
- El reglamento 2015/1185 que indica los requisitos de Ecodesign fue promulgado en abril de 2015 y dio plazo hasta el 1 de enero de 2022 para que los nuevos equipos comercializados cumplieran con los nuevos estándares de eficiencia energética y límites de emisión de contaminantes.
- Los parámetros de los equipos que se comercializan deben medirse y calcularse utilizando los métodos establecidos en la norma de la Unión Europea EN16510-1 para estufas a leña y el EN16510-1-6 para estufas a leña.
- Establece el método para determinar las emisiones de MP en base a recolección de polvo en filtros calientes y de los humos de combustión con analizadores de gases, los cuales están indicados en el Anexo III, punto 4.a.i del reglamento de la Unión Europea³.

En el programa Ecodesign 2022 se establecen criterios para la eficiencia energética y límites de emisión de contaminante, para los equipos de calefacción a leña y pellet, así como para las cocinas a leña, siendo estos indicados en la Tabla 3. Es importante mencionar que para el material particulado se da la opción de reportar los resultados del ensayo para dos unidades distintas, en mg/m³ al 13% de O₂ y g/kg, mientras que, para el resto de los contaminantes, solo se permite el resultado en mg/m³.

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32015R1185>

Tabla 3, Tabla resumen de parámetros de eficiencia energética y emisiones del Ecodesign 2022.

Tipo de equipo	Combustible	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (mg/m ³ al 13% de O ₂)	Emisión de MP (g/kg)	Emisión de COV (mg/m ³ al 13% de O ₂)	Emisión de CO (mg/m ³ al 13% de O ₂)	Emisión de NO _x (mg/m ³ al 13% de O ₂)
Calefactor de frente abierto	Leña	30	50	6	120	2.000	200
Calefactor de cámara cerrada	Leña	65 75 (2022)	40	5	120	1.500	200
	Pellet	79	20	2,5	60	300	200
Cocina	leña	65	40	5	120	1.500	200

Los equipos de frente abierto se ven sometidos a regulaciones menos estrictas debido a sus características particulares. Dada la naturaleza de estos equipos, que cuentan con una cámara de combustión abierta, la falta de un flujo de aire ajustable de manera precisa resulta en una baja eficiencia energética. Además, esta configuración no posibilita la generación de combustión con aire a elevadas temperaturas, lo que limita la capacidad de reducción de emisiones.

En contraste, los equipos con cámara de combustión cerrada ya sean de pellet o leña, están sujetos a normativas más rigurosas. En estos casos, es posible implementar tecnologías específicas para la reducción de emisiones, como entradas de aire secundarias en estufas a leña y reguladores de aire en estufas a pellet, así como mejoras en la aislación de los equipos. Esta mayor flexibilidad permite alcanzar una eficiencia energética superior.

En cuanto a las cocinas a leña, las exigencias en relación con las emisiones son similares a las establecidas para los calefactores a leña. La diferencia radica en la eficiencia energética, siendo generalmente menor en el caso de las cocinas a leña.

6.3. Límites de emisión de la norma de la Agencia de Protección Ambiental EPA

La Agencia de Protección Ambiental en 2015 estableció estándares para garantizar que los nuevos calefactores a leña y pellet de uso residencial fueran menos contaminantes, con el objetivo de mejorar la calidad del aire en Estados Unidos. Los parámetros y aplicabilidad de esta norma están establecidos en la “Standards of Performance for New Residential Wood Heaters, New Residential Hydronic Heaters and Forced-Air Furnaces”⁴

⁴ <https://www.federalregister.gov/documents/2015/03/16/2015-03733/standards-of-performance-for-new-residential-wood-heaters-new-residential-hydronic-heaters-and>

Esta norma contempló la actualización de los límites de emisión para las nuevas estufas de leña y pellet, sin establecer requerimientos de eficiencia energética o diferencias respecto a la potencia térmica (la norma aplica a equipos de calefacción de viviendas, no industriales, de todas las potencias), así como la adición de equipos no regulados hasta ese momento, tales como, las calderas a leña para interiores y exteriores, estufas de interior de tiro forzado a leña, estufas a leña de solo una tasa de quemado. Las calderas de interior y exterior son equipos para proveer de calefacción central por medio de agua caliente, la única deferencia entre estas es la ubicación del equipo, encontrándose la de interior dentro de la vivienda y la de exterior fuera de esta. Por otro lado las distintas estufas de interior normadas se diferencian entre sí por las tasas de quemado y el método de suministro del aire para la combustión, en el caso de las estufas de tiro forzado, el aire requerido es entregado de forma externa a la estufa, lo que permite regular la tasa de quemado de combustible, mismo funcionamiento que tienen las estufas a pellet, mientras que las estufas a leña convencionales cuentan con un regulador de aire para establecer distintos niveles de combustión, salvo las estufas a leña con una única tasa de quemado donde esta posibilidad no existe.

Esta nueva norma fue introducida gradualmente en un periodo de 5 años, a contar de 2015 y solo afectó a los nuevos equipos fabricados y no a los ya existentes. Siguiendo los siguientes plazos:

- La norma entró en rigor 60 días posterior a la publicación en el Registro Federal, desde el cual, los límites de emisión pasaron a ser los del estado de Washington para estufas no catalíticas, la mayoría de las estufas de combustión variable ya cumplían con esos estándares por tanto se consideraron automáticamente certificadas.
- Se les permitió a los comerciantes minoristas vender sus stocks de productos hasta finales de 2015, posterior a esto, las nuevas estufas comercializadas pasaron a regirse por límites del punto anterior.
- Cinco años después de la entrada en vigor de la norma (2020), las estufas pasaron a cumplir estándares más estrictos.

Los nuevos estándares de emisión de MP buscan a su vez disminuir las emisiones de otros contaminantes gaseosos, como los CO, COV y NO_x, los cuales no requieren ser medidos. Estos son establecidos para todos los calefactores a leña y pellet comercializados a partir de 2020, diferenciando un límite u otros dependiendo del formato de leña utilizado por el laboratorio de certificación, donde se permite la prueba por medio de madera en disposición de “cuna” (cribwood en inglés) o de leña de troncos partidos (cordwood en inglés). Los límites de emisión establecidos por esta norma son los indicados en la Tabla 4⁵.

⁵ <https://www.epa.gov/residential-wood-heaters/fact-sheet-summary-requirements-woodstoves-and-pellet-stoves>

Tabla 4, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la EPA de Estados Unidos.

Norma	Equipo	Método de ensayo	Emisiones de MP (g/h)
EPA etapa 2015	Estufas no certificadas	Cribwood	4,5
EPA etapa 2020	Todas las estufas a leña	Cribwood (leña)	2,0
		Cordwood (leña)	2,5
	Todas las estufas a pellet	Método 28	2,0

Para verificar el cumplimiento de esta norma se establecieron los siguientes métodos de fiscalización⁶:

- Se dio un año para certificar los equipos a comercializar, en alguno de los laboratorios acreditados por la EPA, posterior a este año, se exigió certificar los equipos en laboratorios y organismos de certificación acreditados internacionalmente.
- Los equipos comercializados en Estados Unidos deben contar con una etiqueta que indique la certificación por la EPA cumpliendo con los nuevos límites.
- Cada modelo de estufa debe contar con pruebas de laboratorio de una muestra significativa del lote, con el fin de garantizar el cumplimiento de los nuevos estándares.
- Los fabricantes son libres de certificar sus equipos a leña con cualquiera de los dos métodos mencionados (por cordwood o cribwood).
- De todas formas, la EPA indica que las pruebas realizadas por el método de cordwood es más relevante al respecto de las emisiones de contaminantes, ya que **representa una situación más realista del uso de las estufas.**
- Los equipos certificados por el método de cordwood **pueden acceder a una etiqueta especial de la EPA, que indica que las pruebas realizadas corresponden a emisiones más realistas en el hogar.** Esta etiqueta es de uso voluntario.

Para las pruebas con leña, se da la opción de utilizar gran variedad de especies que cumplan con los requisitos de compuestos y poder calorífico establecidos en el documento E2780-10, especificados en la Tabla 57 del ANEXO 14.

Respecto al pellet, esta norma requiere que en los ensayos de estufas que utilicen este combustible, se encuentre certificado por terceros organismos, de tal forma que se cumplan especificaciones mínimas, entre los organismos están el Pellet Fuel Institute (PFI),

⁶ <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/fact-sheet-summary-requirements-woodstoves-and-pellet-stoves>

ENplus y CANplus, de tal forma que se garantice la calidad del pellet utilizado y se puedan cumplir los límites de emisión para la certificación de las estufas.

6.4. Límite de emisión Austria Art. 15a B-VG

Las autoridades de Austria en 2015 establecieron en el Art. 15a B-VG los límites de emisión de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP), y eficiencia de equipos a combustibles sólidos, como estufas manuales de leña, estufas automáticas de pellet. Los métodos de medición establecidos son el EN13240 para estufas manuales (estufas a leña) y EN14785 para estufas automáticas (estufas a pellet)⁷.

En la siguiente tabla se indica el resumen de los límites de emisión comentados.

Tabla 5, Tabla resumen de los parámetros establecidos en el Art.15a B-VG de Austria.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (mg/MJ)	Emisiones de COV (mg/MJ)	Emisión de CO (mg/MJ)	Emisión de NO _x (mg/MJ)
Manual (leña)	80	35	50	1.100	150
Automático (pellet)	80	25	30	500	100

6.5. Límite de emisión Alemania

Las autoridades alemanas establecen sus límites de emisión para estufas a pellet y leña en el “Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes” o 1. BImSchV⁸ de 2010, bajo criterios de MP y CO, así como a la eficiencia de los equipos. Se indican los mismos criterios de la Nordic Ecolabel (versión 3) actualizando sus requerimientos en 2015, siendo estos más estrictos⁹.el cambio en la exigencia se dio 5 años después de la promulgación de la norma.

En la siguiente tabla se indica el resumen de los límites de emisión comentados.

⁷ https://www.nordic-swan-ecolabel.org/495e80/contentassets/df55b91410e5472480635a54b10c7aa2/background-document_078_stoves-078_english.pdf

⁸ https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/1._BImSchV.pdf

⁹ https://www.nordic-swan-ecolabel.org/495e80/contentassets/df55b91410e5472480635a54b10c7aa2/background-document_078_stoves-078_english.pdf

Tabla 6, Tabla resumen de los parámetros establecidos por las autoridades de Alemania.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (mg/Nm ³)	Emisión de CO (mg/Nm ³)
Estufa a leña (antes del 2015)	73	100	2.000
Estufa a leña (posterior al 2015)	73	40	1.250
Estufa a pellet (antes del 2015)	85	50	400
Estufa a pellet (posterior al 2015)	85	30	250

6.6. Límite de emisión norma de Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 4012:2014

Las autoridades de Australia y Nueva Zelanda establecen en el acuerdo AS/NZS 4012:2014 los parámetros para determinar la potencia y eficiencia energética, y en el acuerdo y AS/NZS 4013:2014 los métodos para la determinación de las emisiones de gases de la combustión, para equipos domésticos que utilicen combustibles sólidos. La existencia de estos acuerdos no implica que cada país pueda establecer una regulación propia, que es el caso para la eficiencia energética en Nueva Zelanda, donde se exige un mejor desempeño de los equipos, lo cual está indicado en la National Environmental Standards for Air Quality¹⁰.

Estos acuerdos fueron promulgados en 2014, año en que se indicaron estándares más laxos para los equipos, aspecto que cambió a contar del 1 de septiembre de 2019, donde los requerimientos de eficiencia y emisiones pasaron a ser más estrictos, además de excluir a los calefactores a pellet de las restricciones aplicables a los demás calefactores a combustibles sólidos¹¹.

Los equipos normados son las estufas a leña, chimeneas abiertas, sistemas de calefacción central, cocinas a leña (con al menos una placa intercambiadora de calor para cocinar y con un horno de un volumen no inferior a 28 litros) y estufas a pellet automáticas.

Los límites de emisión y parámetros establecidos en estas normas son los siguientes:

Tabla 7, Límites de emisión y parámetros establecidos.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (g/kg)
Todos los equipos normados Previo al 1/09/2019	55	2,5 (sin convertidor catalítico) 1,4 (con convertidor catalítico)
Todos los equipos normados Posterior al 1/09/2019	60 (Australia) 65 (Nueva Zelanda)	1,5 (sin convertidor catalítico) 0,8 (con convertidor catalítico)

¹⁰ <https://www.legislation.govt.nz/regulation/public/2004/0309/latest/DLM287030.html>

¹¹ https://www.epa.nsw.gov.au/~/_media/EPA/Corporate%20Site/resources/woodsmoke/poeo-regulation-amendment2015.ashx

Es importante mencionar que el límite referente a estufas sin convertidor catalítico es el que será utilizado a futuro en las comparaciones, ya que en Chile no se cuenta con equipos que posean esta tecnología de reducción de emisiones desde su fabricación, esta solo existe cómo dispositivos que se pueden adicionar por separado al calefactor (dados los resultados de las búsquedas de equipos comercializados a nivel nacional que serán desarrollados en el capítulo 7.1).

Por otro lado, los requerimientos de eficiencia indicados por Australia y Nueva Zelanda corresponden a valores determinados por medio de medición directa dentro de una cámara calorimétrica calibrada, lo que difiere del método establecido en el protocolo de ensayo PC N°200/1 y PC N°201/1 para estufas a leña y pellet respectivamente, los cuales corresponden a mediciones indirectas de la eficiencia, razón por la cual los valores de indicados en la Tabla 7 son menos a los exigidos en Chile.

6.7. Límite de emisión norma de Canadá CSA B415.1:22

En Canadá, la Asociación Canadiense de Estándares (CSA, por sus siglas en inglés) establecen en el documento CSA B415.1:22 los límites de emisión y métodos de ensayos por los que se rigen los equipos de calefacción a leña y pellet, los cuales fueron actualizados al año 2022, estableciendo un nuevo método de medición para estufas a leña con su respectivo límite de emisión¹². Para la eficiencia energética se indica el método de determinación, pero no se establece un límite para este.

En esta se especifican los siguientes límites de emisión:

Tabla 8, Límites de emisión norma de Canadá CSA B415.1:22.

Tipo de equipo	Emisión de MP (g/h)
Calefactores a leña y pellet (CSA B415.1-10)	4,5 (sin convertidor catalítico) 2,5 (con convertidor catalítico)
Calefactores a leña (CSA B415.1:22) para mediciones con uso de cordwood	2,5
Calefactores a leña (CSA B415.1:22) para mediciones con uso de cribwood	2,0
Calefactores a pellet (CSA B415.1:22)	2,0

En Canadá, los estándares establecidos para la medición de emisiones son de naturaleza voluntaria dentro de la normativa. No obstante, es importante señalar que cada provincia o municipio tiene la facultad de imponer límites obligatorios. Un ejemplo de ello es la ciudad de Montreal, que en el año 2018 estableció que todas las estufas a leña dentro de su

¹² Material suplementario <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123003581>

jurisdicción no debían exceder las 2,5 g/h, según los métodos de ensayo de la EPA o del CSA B415.1:10.

6.8. Límite de emisión etiqueta ecológica de Austria Umweltzeichen 37

En Austria se puede acceder voluntariamente a la etiqueta ecológica Umweltzeichen 37 para estufas a leña y pellet que cumplan con niveles de emisión de contaminantes más bajos. Cabe recalcar que todos los equipos deben cumplir obligatoriamente con la norma de Austria, mientras que esta etiqueta es de carácter voluntario para los fabricantes.

En esta se establecen requisitos para eficiencia energética, MP, CO, COV y NO_x más estrictos que en la norma propia del país. Para entregar esta etiqueta se deben realizar los protocolos de medición y cálculo establecidos en las EN13240 para estufas manuales (estufas a leña) y EN14785 para estufas automáticas (estufas a pellet)¹³.

En la siguiente tabla se hace un resumen de los requerimientos de la etiqueta ecológica Umweltzeichen 37.

Tabla 9, Tabla resumen de los parámetros establecidos en etiqueta ecológica Umweltzeichen 37 de Austria.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP		Emisión de CO		Emisión de COV		Emisión de NO _x	
		mg/MJ	mg/Nm ³	mg/MJ	mg/Nm ³	mg/MJ	mg/Nm ³	mg/MJ	mg/Nm ³
Estufa a leña	80	30	45	700	1.050	50	75	120	180
Estufa a pellet	90	20	30	120	180	6	9	100	150

Al año 2023, un total de 40 empresas cuentan con esta etiqueta¹⁴, las cuales estas detalladas en la Tabla 10. De estas se destaca que la gran mayoría son fabricantes de equipos de alta potencia (calderas a pellet y leña).

Tabla 10, Empresas que cuentan con la etiqueta Umweltzeichen 37.

Empresa	Tipo de Equipos	País o región
Atelier "K" H&H OG	Estufas a leña y pellet	Austria/Styria
Aug. Rath jun. GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Viena
Bernhard KASCHÜTZ GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Biotech Energietechnik GmbH	Calderas a pellet	Austria/Salzburgo
ETA Heiztechnik GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Franz Kubena	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria

¹³https://www.umweltzeichen.at/file/Guideline/UZ%2037/Long/Uz37_R6.0a_wood_fired_heating_systems_2017.pdf

¹⁴ <https://www.umweltzeichen.at/en/products/green-energy>



Empresa	Tipo de Equipos	País o región
Fröling Heizkessel- u. Behälterbau GmbH	Calderas a pellet	Austria/Alta Austria
Greisberger Kachelöfen	Chimeneas a leña	Austria/Salzburgo
Hafnermeister Philipp Herl	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Hafnertec Bicker GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Hafnertec Heiztechnik GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
HARGASSNER Ges mbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Heizomat – HZA GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Herbert Lorenzer	Chimeneas a leña	Austria/Styria
Herz Energietechnik GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Burgenland
HONS Energiesysteme GmbH	Calderas a pellet	Austria/Alta Austria
Hoval Gesellschaft mbH.	Calderas a pellet	Austria/Alta Austria
Kachelöfen & Kamine, Gottfried Hofbauer	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Keram Leszkovich GmbH	Estufas a leña y pellet	Austria/Burgenland
Keramik Ofenbau Ivancsics Ges.m.b.H.	Chimeneas a leña	Austria/Burgenland
KWB Energiesysteme GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Styria
Lohberger GmbH	Estufas y cocinas a leña	Austria/Alta Austria
MCZ Group spa	Estufas a pellet	Italia
müller ofenbau gmbh	Chimeneas a leña	Austria/Vorarlberg
Ofenbau Jussel	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Ofenmanufaktur Liebewein GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Salzburgo
ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs Ges.m.b.H.	Calderas a pellet	Austria/Alta Austria
Ortner GmbH	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Österreichischer Kachelofenverband	Chimeneas a leña	Austria/Viena
Pertinger GmbH	Cocinas a leña	Italia/Bolzano
RIKA Innovative Ofentechnik GmbH	Estufas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
SOLARFOCUS GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Sommerauer (SL-Technik GmbH)	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Spiegl Max GmbH & Co KG	Estufas a leña	Austria/Vorarlberg
Ullrich & Sohn Ges.m.b.H	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Viessmann GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Alta Austria
Windhager Zentralheizung GmbH	Calderas a leña y pellet	Austria/Salzburgo
Wittek - FEUER IN BESTFORM	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria
Wolf Ges.m.b.H	Chimeneas a leña	Austria/Styria
Zawrel Hafnermeister	Chimeneas a leña	Austria/Baja Austria

6.9. Límites de emisión etiqueta de calidad alemana DIN+

Esta etiqueta voluntaria es entregada por DIN CERTCO para indicar la alta calidad de los productos. Los fabricantes de equipos pueden mostrar con este sello que sus equipos son respetuosos con el medio ambiente con emisiones especialmente bajas. Esta puede ser entregada a equipos para calefacción domésticos a leña y pellet.

Esta etiqueta da cuenta de mayores exigencias para la eficiencia y emisiones de MP, CO, COV y NO_x, para estufas a leña y pellet, bajo pruebas que se realizan siguiendo los métodos de medición y cálculos indicados en el Ecodesign, las cuales deben ser realizadas por un laboratorio aprobado por DIN CERTCO, con una verificación cada dos años y medio para confirmar la calidad de los productos¹⁵.

En la siguiente tabla se indica el resumen de los límites de emisión comentados.

Tabla 11, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la etiqueta DIN+.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (mg/Nm ³)	Emisión de CO (mg/Nm ³)	Emisión de COV (mg/Nm ³)	Emisión de NO _x (mg/Nm ³)
Estufa a leña	73% para uso continuo y 78% para uso intermitente	40	1.500	120	200
Estufa a pellet	90	25	200	10	-

6.10. Límites de emisión de la etiqueta ecológica Blaue Engel

Esta etiqueta voluntaria “Blaue Engel” establecido en el “Stoves for wood (DE-UZ 212)¹⁶” tiene como fin motivar la fabricación de calefactores a combustión que sean más eficientes, y con menos emisiones de contaminantes, lo que exige a los fabricantes que realicen mejoras al diseño de los equipos, como separadores de MP y reguladores de aire que eviten la influencia del usuario o un uso incorrecto. En la actualidad en Chile, solo se comercializa uno de estos equipos, correspondiente al modelo Xeoos[®] Basic Natur, cuyo valor es considerablemente (\$2.299.990 precio del proveedor¹⁷) alto en comparación a calefactores a leña convencionales.

¹⁵ <https://www.dincertco.de/din-certco/en/main-navigation/products-and-services/certification-of-products/heat-generation-and-storage/wood-burning-stoves-...-and-other-domestic-heaters/>

¹⁶ <https://www.blauer-engel.de/en/productworld/stoves-for-wood/stoves>

¹⁷ <https://www.bosca.cl/calefaccion-y-climatizacion/calefactores-a-leña/xeoos-basic-natur>

Esta es dada a calefactores a leña que cumplan con altos estándares de calidad y emisiones de MP, CO, COV y NO_x, a los cuales se les realizan las pruebas y cálculos establecidos en el Ecodesign. En la siguiente tabla se indica el resumen de los límites de emisión.

Tabla 12, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la etiqueta Blaue Engel.

Tipo de equipo	Emisión de MP (mg/m ³)	Emisión de CO (mg/m ³)	Emisión de COV (mg/m ³)	Emisión de NO _x (mg/m ³)
Calefactores a leña	15	500	70	180

En la actualidad cinco fabricantes poseen esta etiqueta, los cuales están detallados en la siguiente tabla:

Tabla 13, Empresas y equipos que cuentan con la etiqueta Blaue Engel.

Empresa	Modelos	Tipo de equipo	Tecnologías de reducción de emisiones	País
Xeoos	BASIC, BASIC ECO GREEN, PURE, NATURAL, PATAGONIA	Estufa a leña	Regulador de aire automático y sistema catalítico	Alemania
Wodtke	Samurai iClean / Samurai oki iClean	Estufa a leña	Regulador de aire automático, sistema catalítico y separador electroestático	Alemania
Skantherm	Skantherm Elements 2.0 K	Estufa a leña	Regulador de aire automático, sistema catalítico y separador electroestático	Alemania
	603 Front	Chimenea a leña	Regulador de aire automático, sistema catalítico y separador electroestático	Alemania
HASE	SILA iQ+, SILA PLUS iQ+, LIMA iQ+	Estufa a leña	Regulador de aire automático y sistema catalítico	Alemania
DROOFF	APRICA 2 (TREND / Plus)	Estufa a leña	Regulador de aire automático, sistema catalítico y separador electroestático	Alemania

Cabe recalcar que, para lograr tan altos estándares, es necesario contar con tecnologías de reducción de emisiones en los equipos, como se observa en la Tabla 13, todos los artefactos que cuentan con la etiqueta Blaue Engel, tiene al menos un sistema catalítico y regulador de aire automático, y tres también adicionan un sistema de separador electroestático de MP.

6.11. Límites de emisión de la licencia Nordic Ecolabelled (versión 4)

En el año 2022, se actualizaron los requerimientos para otorgar la etiqueta voluntaria Nordic Ecolabelled, para estufas a leña y pellet que cumplan con los siguiente:

En la siguiente tabla se indica el resumen de los límites de emisión comentados.

Tabla 14, Tabla resumen de los parámetros establecidos por la licencia Nordic Ecolabelled.

Tipo de equipo	Eficiencia energética (%)	Emisión de MP (g/kg)	Emisión de MP (mg/Nm ³)	Emisión de CO (mg/Nm ³)	Emisión de COV (mg/Nm ³)
Estufa a leña	76	2	-	1.250	100
Estufa a pellet	87	-	15	200	10

6.12. Límites de emisión del D.S. N°39 del MMA de Chile

En esta norma se establecen los requerimientos de emisiones de artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera de hasta 25 kW potencia térmica nominal, para la disminución de emisiones de contaminantes. Esta es aplicable de distinta forma dependiendo de la potencia térmica de cada equipo, estableciendo lo siguiente¹⁸:

Tabla 15, Límites de emisión de MP (g/h) para los calefactores nuevos que combustionan o pueden combustionar leña o pellet de madera de acuerdo con su potencia térmica (kW).

Potencia térmica nominal (kW)	Emisión de MP (g/h)
Menor o igual a 8	2,5
Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5
Mayor a 14 y menor o igual a 25	4,5

Estos parámetros son fiscalizados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), quienes establecen los protocolos de ensayo y cálculo de los equipos, mediante los protocolos PC200/2 para estufas a leña y PC201/2 para estufas a pellet, todos bajos los métodos CH-5G¹⁹ y CH-28²⁰.

Esta norma y métodos de ensayo están basados en lo establecido por la EPA y en la actualidad solo el laboratorio Cesmec cuenta con la certificación del INN para certificar estos equipos en Chile.

¹⁸ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1042254&idParte=&idVersion=>

¹⁹ [https://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-5G%20\(2\).pdf](https://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-5G%20(2).pdf)

²⁰ <https://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-28%20%282%29.pdf>

6.13. Descripción unidades de medidas de los límites de emisión.

Para poder realizar un análisis al respecto de los límites de emisión de otros países, es necesario detallar las unidades de medida de estas, cuáles son sus implicaciones y qué información entregan. A continuación, se detallan las unidades levantadas:

- **g/h**: esta unidad mide los gramos de contaminante (en particular de MP) por cada hora de combustión. Esta unidad se usa para cuantificar la cantidad de material sólido que es capturado de los humos de combustión, en el tiempo de duración del ensayo. **Esta unidad es utilizada en Estados Unidos y Chile como indicador de los límites de emisión permitidos para el uso de estufas** y va en consecuencia del método de muestreo utilizado en estos países, que es por túnel de dilución, donde se rescatan las partículas sólidas y parte de los COV que se diluyen en el sistema. Como se indicó, dado el método que se utiliza para normar las emisiones de MP en g/h, estas suelen ser mayores al contener dentro de las muestras algunos COV que se diluyen en el sistema de medición, por tanto, no representan la misma masa que puede ser medida con otros métodos, como el método de filtros calientes de utilizado en los ensayos de la Unión Europea²¹.
- **mg/m³**: Esta unidad mide los gramos de contaminante por unidad de volumen de la muestra. Es usada para cuantificar la concentración de partículas o gases dentro de los humos de combustión, dentro de un volumen medido. **Esta unidad es utilizada principalmente en países de Europa²² como indicador para las emisiones de MP, CO, COV y NO_x**, precedentes de los humos de combustión. Esta es utilizada en sistemas donde se mide el volumen de gas liberado en conjunto a un sistema de filtros que retienen las partículas sólidas y equipos analizadores que miden la cantidad de gases de la combustión. Utilizar esta unidad requiere la medición de volumen de los humos de combustión y sistemas alternos para medir la masa de los gases contenidos, donde se mide la concentración durante la prueba, en los tiempos establecidos para cada equipo. Esta unidad además debe ser calculada respecto al 13% de contenido de O₂.
- **mg/MJ**: Esta unidad mide los gramos de contaminante por unidad de energía del combustible utilizado. Es usada para cuantificar la masa de partículas o gases que son liberadas en los humos de combustión dado el poder calorífico del combustible utilizado. **Esta unidad es utilizada en Austria** y representa un medio alternativo para cuantificar las emisiones, para sistemas donde no se mida el volumen de los gases,

²¹ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.0c04148>

²² <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2015-81430>

realizando los cálculos respecto a la energía suministrada por el combustible utilizado.

- **g/kg:** Esta unidad mide los gramos de contaminante (en particular de MP) por cada kilogramo de combustible utilizado. Esta se usa para cuantificar la masa de partículas que son capturadas de los humos de combustión por el uso de cierta cantidad de combustible sólido. **Esta unidad es indicada como método alternativo para cuantificar las emisiones de MP en las regulaciones de la EU además de ser utilizada en las mediciones de Australia y Nueva Zelanda²³ además de ser indicada como método alternativo para cuantificar las emisiones de MP en las regulaciones de la EU,** En este método no es necesario medir el volumen de los humos de la combustión, realizando los cálculos respecto a la masa de combustible utilizada en los ensayos.

6.14. Conversión entre unidades de medida de las normas

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, las normativas de los distintos países están determinadas por el método de medición y sus resultados se expresan en unidades distintas. Para poder hacer una comparación, es necesario uniformar las unidades. En esta sección se hará una estimación de los factores para el cambio de unidades, utilizando la mejor información disponible, para estufas a leña pequeñas, con potencia menor a 25 kW y con parte frontal cerrada.

6.14.1.1. Conversión de (mg/m^3) a (g/kg).

- Es posible calcular la equivalencia entre una norma en unidades de mg/m^3 y una norma en unidades de g/kg del modo indicado a continuación.
- Si la norma está dada en unidades de g/kg , es decir gramos de material particulado emitido dividido por la masa en kg de leña utilizada. Se puede utilizar la tasa de quemado para convertir la g/kg a g/hr . De acuerdo al estudio de la CDT⁴¹, para los calefactores doble cámara, se tiene una tasa de 0,6 - 2,5 kg/h , luego la media de las tasas de quemado sería de 1,55 kg/h . Si se tiene, por ejemplo una norma de 5 g/kg , se multiplica por 1,55 kg/hr y se obtiene 7,75 kg/hr . Esto indica que en una hora de funcionamiento de la estufa se emiten 7,75 mg de material particulado. Por otro lado, las velocidades volumétricas de los gases de salida de las estufas, de acuerdo a la Norma

²³ <https://ablis.business.gov.au/service/act/as-nzs-4013-2014-domestic-solid-fuel-burning-appliances-method-for-determination-of-flue-gas-emission/3649>



de ensayos: NCh 3173 Of 2009 son de $4,00 \pm 0,45 \text{ m}^3/\text{min}$. Es decir, en una hora el volumen del gas emitido por la estufa es de $4,00 \times 60 = 240 \text{ m}^3$. Dividiendo la cantidad de material particulado emitido por el volumen de gas, se obtiene $32,3 \text{ mg}/\text{m}^3$. Es decir de acuerdo a este cálculo, una norma de $5 \text{ g}/\text{kg}$ es equivalente a una norma de $32,3 \text{ mg}/\text{m}^3$. Sin embargo, si se utiliza la tasa de quemado más baja de $0,6 \text{ kg}/\text{hr}$ se obtiene una equivalencia de $12,5 \text{ mg}/\text{hr}$. Si se usa la tasa de quemado más alta, la equivalencia es de $52,0 \text{ mg}/\text{m}^3$. Por ello, hay una gran variabilidad en la conversión de unidades.

- Por otro lado, las normas europeas indican tres métodos de medición para estufas a leña pequeñas con parte frontal cerrada. Uno de los métodos utiliza unidades de (mg/m^3) y los otros dos utilizan unidades de (g/kg). Estos métodos están descritos en la sección 6.2.
- La diferencia entre el método 2) y el método 3), es que en el primer caso, se deben medir las emisiones provenientes de toda la masa quemada y en el método 3) se debe medir durante 30 min. En el método 2), se incluyen las emisiones durante el proceso de encendido y de apagado, que normalmente son más altas. En el método 3) se mide durante el estado estacionario, que normalmente tiene menores emisiones. Por ello, el método 2) es probablemente el más parecido al método 1). El método 3) puede no dar emisiones representativas, ya que dependen del instante en que se comienza la medición.
- Luego, vamos a suponer que el método 1) es equivalente al método 2). El método 1) establece una norma de $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ y el método 2) establece una norma de $5 \text{ g}/\text{kg}$. Es decir, si una estufa se mide con la metodología 1) no deben superar los $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ y cuando la misma estufa se mide con el método 2), no debe superar los $5 \text{ g}/\text{kg}$. Luego de acuerdo a la norma europea, la conversión es: $5 \text{ g}/\text{kg}$ equivale a $40 \text{ mg}/\text{m}^3$.
- El valor de $5 \text{ g}/\text{kg}$ equivale a $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ indicado por la norma europea está dentro del rango calculado antes utilizando las tasas de emisión y que varía entre $12,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $52 \text{ mg}/\text{m}^3$.
- Al coincidir ambas metodologías de conversión, se va a utilizar lo indicado por la norma europea, es decir $5 \text{ g}/\text{kg}$ equivale a $40 \text{ mg}/\text{m}^3$.

6.14.1.2. Conversión de (g/kg) a (g/h).

Para realizar la conversión entre estas unidades es necesario conocer la tasa de quemado de las estufas. Sin embargo, esta tasa es muy variable y depende del tipo de estufa, tal como se muestra en la Tabla 16, de acuerdo al estudio de la CDT⁴¹ Para los calefactores doble cámara, se tiene una tasa de $0,6 - 2,5 \text{ (kg/h)}$, luego la media de las tasas de quemado sería de $1,55 \text{ kg/h}$ que se puede utilizar para la conversión de unidades. Para convertir una emisión dada en (g/kg) a (g/h) se debe multiplicar por $1,55 \text{ kg/h}$.

Tabla 16. Tasas de quemado para distintos tipos de artefactos a leña. (fuente: estudio CDT²⁴).

Equipo	Potencia ⁸⁷ kW	Rango Tasas de quemado (min - máx.) en kg/h	Fuente
Calefactor doble cámara grande	10,5	1– 3,5	Ficha técnica de calefactores de Amesti / Bosca ^(a)
Calefactor doble cámara pequeño (por defecto)	7,0	0,6 – 2.5	Ficha técnica de calefactores de Amesti / Bosca ^(a)
Salamandra	8,7	0,6 – 4,0	Ambiente Consultores ^(b)
Brasero	4,0	0,4 – 0,6	Elab. Propia en base a búsqueda bibliográfica
Estufa simple	8,7	0,6 – 4,0	Idem. Salamandra (Ambiente Consultores) ^(b)
Chimenea abierta	15,0	1 – 6	Ambiente Consultores ^(b)
Chimenea cerrada (Insert)	17,4	1 – 5	Ficha técnica de calefactores de Amesti / Bosca ^(a)
Estufa pellets	11,6	0,6 – 1,6	Ficha Técnica proveedores ^(c)
Cocina a leña	9,1	1,0 – 4,0	SERPRAM (2006) ^(d)
Calderas a biomasa	25,0	1 - 4	Ficha técnica Servimet ^(a)

a. Búsqueda web , Mayo 2015

b. Ambiente Consultores (2010) “Análisis Comparativo de Programas de Recambio Tecnológico para Estufas a Leña y Evaluación de su Implementación en la R.M.”, para CONAMA R.M.

c. Búsqueda web a distintos proveedores de calefactores a pellets , Mayo 2015

d. Estudio “Medición de Artefactos de Uso Residencial que Operan con Biomasa para apoyar Procesos Regulatorios Ambientales” (SERPRAM, 2006)

6.15. Comparativa entre los límites y normas

6.15.1. Normas europeas

Todas las normas internacionales existentes exigen límites de emisión de material particulado para las estufas a leña o pellet. Sin embargo, las normas europeas además exigen límites de emisión para NO_x, CO y compuestos orgánicos volátiles (VOC en inglés o COV en español). En el caso de Europa, existen tres metodologías de ensayo para el material

²⁴ <https://calefaccionsustentable.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/Medicion-del-consumo-nacional-de-leña-y-otros-combustibles-solidos-derivados-de-la-madera.pdf>



- 1) Medición de partículas mediante análisis de una muestra parcial de gas de combustión seco a través de un filtro caliente. La medición de las partículas presentes en los productos de la combustión del aparato se llevará a cabo con el producto funcionando a potencia nominal y, si procede, con carga parcial. Los resultados de este método se entregan en unidades de (mg/m^3).
- 2) La medición de partículas mediante recogida, durante el ciclo de combustión completo, de una muestra parcial de gas de combustión diluido en circulación natural utilizando un túnel de dilución de flujo total y un filtro a temperatura ambiente. Los resultados de este método se entregan en unidades de (mg/kg).
- 3) La medición de partículas mediante recogida, durante 30 minutos, de una muestra parcial de gas de combustión diluido en circulación fija a 12 Pa utilizando un túnel de dilución de flujo total y un filtro a temperatura ambiente, o un precipitador electrostático. Los resultados de este método se entregan en unidades de (mg/kg).

Por otro lado, el método 1) también se debe utilizar una muestra parcial de gas, en que las emisiones también pueden depender del instante en que se comienza la medición. Este método puede no ser representativo de las emisiones totales de una estufa. También, el método puede depender de la tasa de quemado (o tiraje) ya que si la tasa de quemado es alta, el volumen de gas que sale durante el tiempo de la medición es alto y el la masa emitida es baja.

En Europa la situación es variada y exige distintos límites de emisiones y eficiencia por tipo de equipo (estufas, chimeneas y cocinas) y por tipo de energético. Siendo en general más exigentes con los equipos que utilizan pellet (en MP los límites son la mitad de lo requerido a estufas a leña). Para otros contaminantes las diferencias son mayores, dadas las composiciones del energético ya que en la combustión de pellet se esperan menor cantidad de emisiones de CO y COV. Es importante mencionar que en la EU existe una regulación y exigencia hacia las cocinas a combustibles sólidos.

Considerando lo anterior, y como se indicó en la sección 6.2 se va a utilizar la equivalencia entre métodos de **40 mg/m^3 equivalen a 5 g/kg** , que se va a utilizar para comparar las normas existentes en distintos países.

6.15.2. Norma de Estados Unidos

La norma de la EPA no se hace diferencia respecto a la potencia de los equipos ni el tipo de energético, tampoco están obligados a indicar eficiencia energética. Como método de medición se puede usar el Estándar E2515-11. Todas estufas se rigen por el mismo límite de emisión, pero el método de ensayo distingue como se carga la leña en la estufa (“Cribwood” y “Cordwood”, ver Figura 4). Por ello, desde el año 2020 existen dos normas según el método de carga de leña.



- 1) Carga tipo “Cordwood” tiene un límite de emisión de 2,5 g/h siendo igual al requerimiento actual en Chile para calefactores de baja potencia.
- 2) Carga tipo “Cribwood” tiene un límite de emisión de 2,0 g/h.

La primera gran diferencia entre las normas internacionales está dada por la EPA, donde la forma de medir los límites de emisión es por medio de g/h de MP emitidos acumulados en el proceso de combustión, sin considerar otros contaminantes y regulación de la eficiencia de los equipos. Por otro lado, están las normas y recomendaciones de Europa, los cuales tienen especificaciones respecto a la eficiencia energéticas de los equipos y las emisiones de contaminante incluyendo los gases provenientes de la combustión.

Estas diferencias se basan en los métodos utilizados para realizar los muestreos de los equipos, siendo la metodología de la EPA un sistema de captura de emisiones donde no existe la adición de analizadores de gases de la combustión, aspecto que es considerado en el método de ensayo de la EN.

Por otro lado, en la norma de la EPA no se hace diferencia respecto a la potencia de los equipos, aspecto que es diferencial en la norma de Chile. Esto implica que, para los equipos de gran potencia térmica comercializados en Estados Unidos, se les exija límite más estricto de cumplir, que para los equipos pequeños.

Desde 2020 la norma de la EPA para los calefactores es de 2,0 g/h (siguiendo el mismo método de medición) siendo más estricto que el requerimiento actual en Chile para calefactores de baja potencia. De esta forma la norma de la EPA a contar de 2020 es más exigente que la chilena.

En Europa la situación es variada y exigen distintos límites de emisiones y eficiencia por tipo de equipo (estufas, chimeneas y cocinas) y por tipo de energético. Siendo en general más exigentes con los equipos que utilizan pellet (en MP los límites son la mitad de lo requerido a estufas a leña). Para otros contaminantes las diferencias son mayores, dadas las composiciones del energético ya que en la combustión de pellet se esperan menor cantidad de emisiones de CO y COV. Es importante mencionar que en la EU existe una regulación y exigencia hacia las cocinas a combustibles sólidos.

Otro aspecto importante es que en los requerimientos de la EU se establecen tres métodos para calcular las emisiones de MP, dando la opción a los laboratorios de elegir una u otra, esta diferencia se centra en realizar el cálculo normalizando en base al volumen del humo de la combustión o por el peso del combustible utilizado en el ensayo. Este aspecto tiene aspectos interesantes de abordar, por un lado, el cálculo del MP normalizado por el volumen de los humos, da cuenta de la concentración de este durante las pruebas, en las cuales se busca mantener un caudal constante, que no contienen en todo momento las mismas cantidades de MP, dados los procesos internos de la combustión, mientras que el cálculo de MP realizado mediante la normalización por la masa de combustible utilizada,

indica que tan efectivo es el equipo para disminuir las emisiones provenientes de la quema de una cantidad fija de combustible, ya que un resultado menor, da cuenta de un proceso de combustión de mayor calidad, que será inherente al energético utilizado. De esta forma, los resultados expresados normalizados por la masa de combustible utilizado pueden dar una perspectiva de la calidad de la combustión.

Dada la información levantada los requerimientos de la EU u otras autoridades de Europa tienen menor exigencia que las indicadas por las entidades que otorgan sellos ecológicos voluntarios. Estos sellos son de interés para algunos fabricantes a la hora de comercializar sus productos, demostrando un compromiso con el medio ambiente, destacando el caso del sello Blaue Engel, el cual tiene la mayor exigencia para los calefactores a leña, siendo requeridas la aplicación de tecnologías de disminución de emisiones como sistemas catalíticos, reguladores de aire automáticos y separadores electrostáticos de MP.

Tabla 17, Ventajas y desventajas de normas o etiquetas voluntarias.

Norma o etiqueta voluntaria	Ventajas	Desventajas
Norma Unión Europea	<ul style="list-style-type: none"> Establece estándares obligatorios a los países adscritos Da límites a otros contaminantes (CO, COV y NO_x) y eficiencia energética 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere que los laboratorios utilicen analizadores de gases. Permite métodos de prueba alterno que no describen las mismas situaciones de contaminación.
Norma EPA	<ul style="list-style-type: none"> No hace diferencia entre las potencias de los equipos. Establece límites estrictos de emisiones. Da la opción de medir utilizando leña de laboratorio o leña convencional. 	<ul style="list-style-type: none"> No regula la eficiencia energética de los equipos. No establece límites para los gases de la combustión.
Norma de Austria Art. 15a B-VG	<ul style="list-style-type: none"> Establece un mayor requerimiento de eficiencia energética que lo indicado por la EU 	
Norma Alemana	<ul style="list-style-type: none"> Establece un mayor requerimiento de eficiencia energética que lo indicado por la EU. 	<ul style="list-style-type: none"> Solo establece límites para el MP y CO.
Norma de Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 4012:2014	<ul style="list-style-type: none"> Establece estándares de eficiencia energética y emisión de MP Las emisiones de MP son más estrictas que lo requerido para los países de Europa. El indicador de emisiones está normalizado por la cantidad de combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> No establece límites para los gases de la combustión.

Norma o etiqueta voluntaria	Ventajas	Desventajas
Etiqueta ecológica de Austria Umweltzeichen 37	<ul style="list-style-type: none"> • Establece requerimientos más estrictos para las emisiones y eficiencia energética de lo indicado en la norma de Austria. • Permite contar con un sello ecológico para los equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es de carácter voluntario.
Etiqueta ecológica DIN+	<ul style="list-style-type: none"> • Es similar a la norma de Alemania, con mayor exigencia para equipos a pellet. • Requiere la medición de 	<ul style="list-style-type: none"> • Es de carácter voluntario.
la etiqueta ecológica Blaue Engel	<ul style="list-style-type: none"> • Establece los límites más estrictos de para los equipos a leña. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere que los fabricantes utilicen tecnologías de altos estándares de reducción de emisiones. • Es de carácter voluntario.
Norma Chilena D.S. N°39 MMA	<ul style="list-style-type: none"> • Es una norma con altos estándares de exigencia. • Establece requerimientos para la eficiencia energética y emisiones de MP. 	<ul style="list-style-type: none"> • No contempla equipos de potencias térmicas superiores a 25 kW. • Deja fuera a las cocinas a leña. • No establece límites para los gases de la combustión.

De acuerdo con los factores de conversión anteriores, se puede obtener los siguientes valores para para estufas a leña pequeñas, con potencia menor a 25 (kW) y con parte frontal cerrada. El gráfico de la Figura 3 muestra las normas de varios países en unidades homologadas de (g/h).

Tabla 18. Normas de emisiones para estufas pequeñas de carga frontal y homologación entre normas.

País	Tipo de equipo	Combustible	Emisiones (norma)	Emisiones (g/h)
Estados Unidos y Canadá	Todas las estufas	Cordwood	2,5 (g/h)	2,5
		Cribwood	2 (g/h)	2,0
Unión Europea	Calefactor cerrado	Leña	40 (mg/m ³)	7,8
Austria	Calefactor manual	Leña	90 (mg/m ³)	17,4
Noruega	Calefactor	Leña	5 (g/kg)	7,8
Australia y Nueva Zelanda	Calefactor	Leña/pellet	1,5 (g/kg)	2,3
Chile	Calefactor	Leña/pellet	2,5 (g/h)	2,5

Como lo muestra la figura, la norma más baja es la de Estados Unidos / Canadá para carga de leña tipo “Cribwood”, luego la Australia / Nueva Zelanda, luego están la segunda norma de Estados Unidos y Chile. Las normas europeas son más altas.

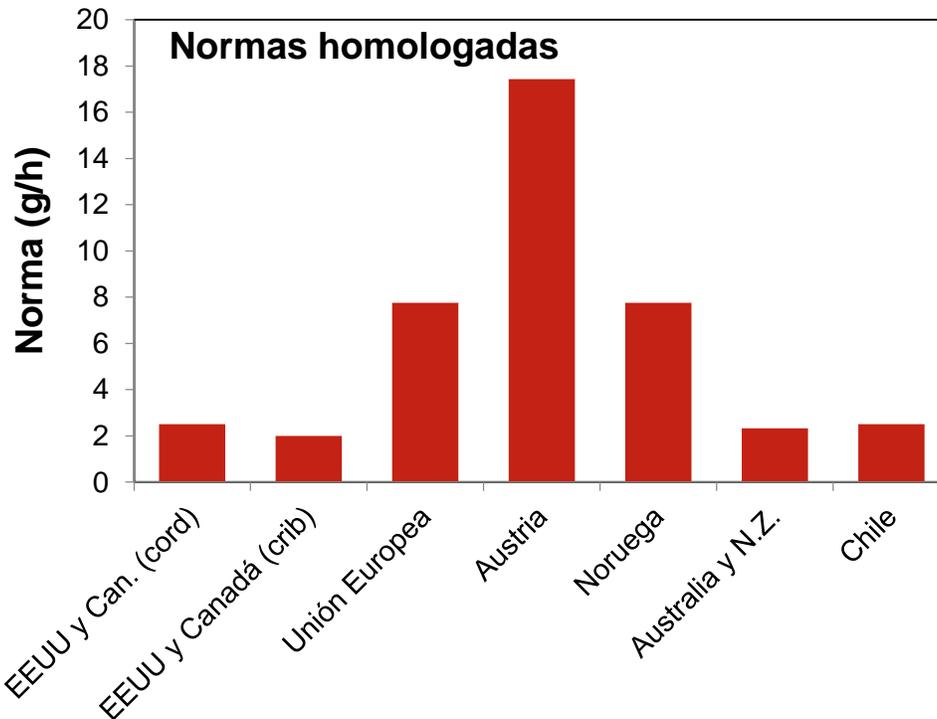


Figura 3. Normas de emisión de estufas pequeñas homologadas a (g/h).

6.16. Método de ensayo norma EPA

En este apartado se describirá el método de ensayo indicado por la EPA, específicamente el relacionado al método E2515-11 (2017) “Standard Test Method for Determination of Particulate Matter Emissions Collected by a Dilution Tunnel” para determinación de las emisiones de material particulado por recolección en un túnel de dilución. Además de los métodos específicos para la determinación de las emisiones de MP de estufas a leña indicadas en el E2780-10 (2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters” y de estufas a pellet indicadas en el E2779-10 (2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Pellet Heaters”.

Este método de prueba es utilizado para la determinación de material particulado por el uso de estufas o equipos a combustibles sólidos, como la leña y el pellet, donde dependiendo del energético se cambia el sistema de testeo, manteniendo el mismo sistema de recolección de MP por túnel de dilución.

A modo de resumen, este método consiste en la extracción de los gases de combustión de equipos que queman combustibles sólidos en un túnel de dilución con campaña de recolección. Para esto se utilizan trenes de muestreo para extraer las muestras del túnel y así determinar la concentración de partículas. Cada tren de muestras contiene dos filtros de fibra de vidrio en serie, estas muestras se extraen a una tasa consistentemente proporcional a los puntos de muestreo ubicados en el centro del túnel, en el proceso de medición estos filtros se mantienen a una temperatura de 32°C. La masa de las partículas muestreadas se determina gravimétricamente después de eliminar el agua producto de la combustión y la masa total de las partículas recolectadas en los filtros se determina matemáticamente respecto a la relación entre el flujo del túnel de dilución y el flujo de las muestras, para determinar las emisiones totales de partículas durante la prueba.

Una de las diferencias que establece este método con respecto a lo realizado anteriormente, es la posibilidad de realizar los ensayos con dos formatos de leña distintos, uno en disposición de cuna o “cribwood” (formato utilizado históricamente en el método) y uno cercano a la realidad de uso de leña residencial “cordwood”, en la Figura 4 se muestra una foto de ambos formatos. El protocolo para realizar el testeo con leña en sus dos formatos se encuentra en el documento E2780-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters”, donde se establecen las dimensiones y características del combustible (mayor detalle en el punto 14).

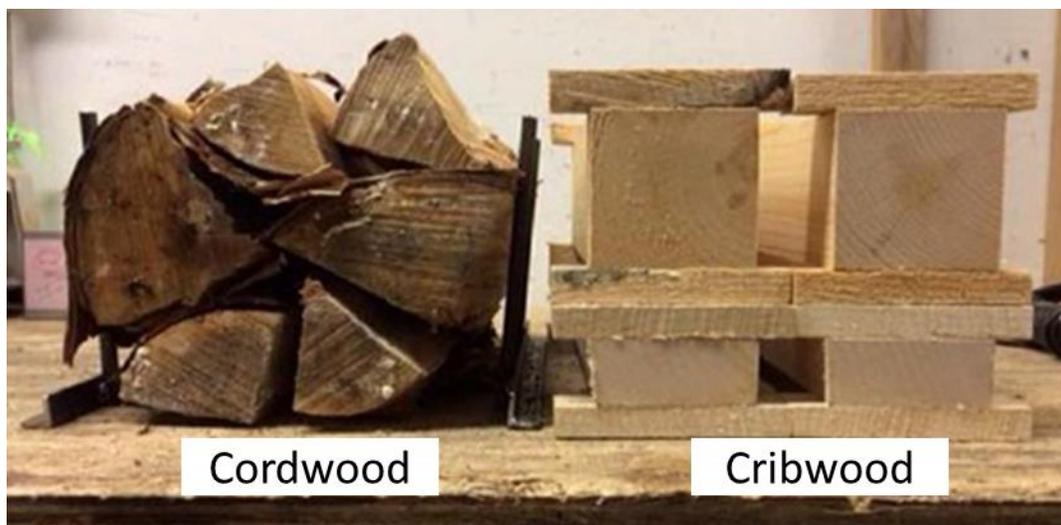


Figura 4, Imagen de una disposición de cordwood y cribwood para mediciones en estufas a leña.

Los calefactores a leña son probados a distintos porcentajes de quemado de combustible, estableciendo tres mediciones para categorías baja, media y máxima, las cuales están descritas en la Tabla 19, donde se indica la tasa de quemado en (kg/h) y el porcentaje de combustión requerida para cada prueba.

Tabla 19, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de la EPA E2780-10(2017).

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3
Combustión absoluta (kg/h)	Entre 0,60 y 1,15	Entre 1,16 y 1,75	máxima
Combustión relativa al máximo (%)	Entre 18 y 35	Entre 36 y 53	100

Para estufas a pellet, el protocolo de suministro de combustible está descrito en el documento E2779-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Pellet Heaters”, donde se establecen al igual que lo ocurrido con la leña, las características del pellet y la forma de suministro.

Dadas las características de los equipos a pellet que pueden ser testeados, se establecen diferencias para establecer las tasas de quemado, la cantidad de ensayos y los tiempos de duración de estos.

Para equipos con tres tasas de quemado, se establece lo indicado en la Tabla 20, para equipos con dos configuraciones de potencia se sigue según lo indicado en la Tabla 21, mientras que para equipos con cuatro o más configuraciones de potencia, se deben realizar tres ensayos, estableciendo el mínimo, el máximo, y la configuración que más se acerque al 50% de potencia.

Tabla 20, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a pellet, de tres configuraciones de potencia, de la norma de la EPA E2779-10(2017).

	Categoría 1 Mínimo	Categoría 2 Medio	Categoría 3 Máximo
Descripción	Mínimo aplicable	Aproximadamente 50% aplicable	Máximo aplicable
Tiempo de quemado (minutos)	180 ± 5	120 ± 5	60 ± 5

Tabla 21, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a pellet, de dos configuraciones de potencia, de la norma de la EPA E2779-10(2017).

	Categoría 1 Mínimo	Categoría 2 Máximo
Descripción	Mínimo aplicable	Máximo aplicable
Tiempo de quemado (minutos)	300 ± 5	60 ± 5

6.17. Método de ensayo norma de la Unión Europea

El método de ensayo establecido por la unión europea está indicado en el documento EN16510-1 “Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods”, que recibió una actualización en el año 2022, este aplica a equipos residenciales que queman combustibles sólidos. En este se especifican los requisitos para realizar las mediciones de emisiones de contaminantes, en partículas para el MP, CO, NO_x y COV.

Los equipos por medir deben instalarse según las indicaciones establecidas en el método en disposición de triedro simulando las paredes de la habitación real donde son ubicados dentro de las viviendas.

Los humos de la combustión son captados mediante una chimenea donde están ubicados los sensores y filtros. Para medir el MP se utiliza una disposición de filtros calentados a 180°C (para evitar la condensación de compuestos del gas) que recolecta el polvo que luego es pesado para determinar la masa total de MP recolectada. Mientras que los gases son medidos mediante analizadores de gases especializados para cada uno de sus componentes.

Durante el proceso de medición se deben registrar parámetros como la temperatura, la presión y el caudal del humo de la combustión, el cual se verifica que se mantenga constante durante el proceso.

En general con este método, se realiza la medición para:

- Los equipos a leña, en tres ciclos a carga nominal y tres ciclos a carga parcial, hasta completar cada uno o hasta un máximo de 120 minutos continuos.
- Para chimeneas empotradas, se realizan tres mediciones a carga nominal y tres a carga parcial, hasta finalizar cada uno o un máximo de 120 minutos continuos.
- Para cocinas a leña, se realizan tres mediciones a carga nominal y tres a carga parcial, hasta finalizar cada uno o un máximo de 120 minutos continuos.
- Para estufas a pellet, se realizan 2 x 3 (6 mediciones en total) mediciones a carga nominal de 30 minutos cada una y seis mediciones a carga parcial de 20 minutos cada una.

Estos resultados son promediados para lo obtenido en carga parcial y carga nominal. Estos conceptos hacen referencia a la potencial térmica configurada de los calefactores. La carga nominal está dada por el fabricante y en el proceso de medición es verificada para realizar las mediciones, mientras que la carga parcial, se establece como un porcentaje de la carga nominal, la cual para equipos de potencias nominales menores a 5 kW corresponde a menos de la suma del 40% de la carga nominal más 2 kW, mientras que para equipos de potencia nominales mayores a 5 kW, corresponde a menos del 80% de la carga nominal.

Mayor detalle del método en el punto 14.2.



6.18. Método de ensayo norma Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 4012:2014 y AS/NZS 4013:2014

En Australia y Nueva Zelanda están especificadas las directrices de los métodos de medición y cálculo, para la certificación de calefactores a leña y sus derivados, en los documentos AS/NZS 4012:2014²⁵ y AS/NZS 4013:2014²⁶. Donde se dan las indicaciones para realizar la carga del combustible (16,5% del volumen de la cámara de combustión), dimensiones de este (según las dimensiones de la cámara de combustión), entre otros.

Para calefactores a leña el método recomienda realizar un pre-acondicionamiento en el equipo, quemando combustible a la tasa de combustión más alta, en dos periodos de al menos 8 horas para equipos sin catalizador y tres periodos de 8 horas para equipos con catalizador. Posterior se requiere la realización de un ciclo de pre quemado que garantice las condiciones ideales para la combustión, generando un lecho de brasas previo a los ciclos de quemado de las pruebas. Para equipos a pellet, el procedimiento establece un ciclo de pre-combustión durante al menos una hora.

Este método establece la realización de los ciclos de quemado a tres velocidades de combustión (alta, media y baja), donde para cada una de estas se ejecutan tres ciclos de quemado (hasta agotar el combustible), esto para los equipos a leña, mientras que, para los equipos a pellet, se requieren dos ciclos para las distintas velocidades de combustión (alta, media y baja), donde cada uno de estos debe tener una duración de al menos 2 horas.

Las emisiones de MP son medidas mediante la recolección de los humos de la combustión dentro de un túnel de dilución similar a lo indicado en la EPA, las mediciones de masa se realizan gravimétricamente (se mide la masa antes y después) y los factores se calculan promediando los resultados de cada uno de los ciclos de quemado realizado. Estos son indicados como la relación entre la masa de MP capturada y la masa de combustible utilizado, reportando los resultados en (g/kg).

6.19. Método de ensayo norma de Canadá CSA B415.1:22

El método de ensayo para la determinación de MP establecidos por las autoridades canadienses en el documento CSA B425.1:22 "Performance testing of solid-biofuel-burning heating appliances. 2022"²⁷ se basa en lo indicado por el CSA B425.1-10.

²⁵ Australian/New Zealand Standard. AS/NZS 4012:2014 domestic solid fuel burning appliances—method for determination of power output and efficiency. 2014.

²⁶ Australian/New Zealand Standard. AS/NZS 4013:2014 domestic solid fuel burning appliances—method for determination of flue gas emission. 2014.

²⁷ CSA Group. CSA B415.1:22 Performance testing of solid-biofuel-burning heating appliances. 2022.

El testeo de equipos sigue lo indicado por el método 28R de la EPA, con la captación de los humos de combustión por medio de un túnel de dilución, no proporcionando métodos alternativos a este.

Para realizar las mediciones se establecen los mismos formatos de leña indicados por la norma de la EPA (cribwood y cordwood), preferentemente de abeto Douglas, para estufas a pellet, se debe utilizar un combustible de un contenido de humedad no superior al 8%.

Las pruebas constan de 4 ciclos de quemado, para velocidades de combustión distintas, Estas tasas se definen en términos absolutos de combustión del energético en kg/h y como un porcentaje respecto a la tasa máxima que puede alcanzar el equipo, indicados en la Tabla 22. Las mediciones del MP se realizan gravimétricamente y los resultados de los cuatro ensayos son promediados para establecer la emisión de cada calefactor.

Tabla 22, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de Canadá CSA B415.1:22.

Tipo de prueba	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
Combustión absoluta (kg/h)	≤ 0,80	Entre 0,81 y 1,25	Entre 1,26 y 1,90	Máxima
Combustión relativa al máximo (%)	< 35	Entre 36 y 52	Entre 53 y 76	100

6.20. Método de ensayo norma chilena

El método de ensayo para MP utilizado en Chile, tal como se comentó previamente, está establecido en los protocolos PC200-2 para estufas a leña y el PC201-2 para estufas a pellet, donde se utiliza el método CH-5G para la determinación de MP desde un túnel de dilución y el método CH-28 que indica las características del combustible y tasa de combustión requeridas, los cuales están basados en los métodos indicados por la EPA.

En el método CH-5G se hace referencia a las características del sistema de muestreo por túnel de dilución, materiales que se deben utilizar, sus características, pasos a seguir para recabar los datos y los cálculos necesarios para determinar los niveles de emisión de los equipos. Por otro lado, el método CH-28 da cuenta de los equipamientos y material requeridos para realizar el testeo de los energéticos, así como de las características de estos, formato, dimensiones, niveles de humedad y metodología para el suministro de estos.

En general estos testeos cuentan de un proceso de pre-combustión del equipo, para formar una cama de brazas adecuada para la realización de las pruebas, en el caso de estufas a leña, para posteriormente adicionar la madera en una disposición de cuna, con las dimensiones indicadas en el método.

Los ensayos para estufas a leña son realizados para 4 velocidades de combustión (al mínimo de entrada de aire, al máximo de entrada de aire y dos disposiciones intermedias, definidas en la Tabla 25). Para estufas a pellet se siguen las indicaciones del manual del equipo para establecer los niveles de combustión. Luego de realizadas estas mediciones se realizan los análisis gravimétricos para determinar la masa de MP y se realiza un promedio ponderado de los resultados de cada ensayo para establecer la tasa de emisiones de cada equipo.

Tabla 23, Categorías de combustión para las pruebas de estufas a leña, de la norma de Chile según el método CH-28.

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
Combustión absoluta (kg/h)	≤ 0,80	Entre 0,81 y 1,25	Entre 1,26 y 1,90	Máxima

Las categorías de combustión del método CH-28 son idénticas a lo establecido en la norma de Canadá, donde las categorías 1, 2 y 4 son iguales a fijado en la norma de EPA, de Estados Unidos.

6.21. Comparativa entre los métodos de ensayo

A modo de resumen el método descrito en la EPA consiste en la extracción de los humos de combustión hacia un túnel de dilución, en el cual se retiene el MP y parte de lo COV que pueden ser diluidos. Por otro lado, el método de la EN 16510 corresponde a la captura de los humos de la combustión hacia un filtro caliente (para evitar la condensación de gases) que atrapa el MP y una serie de analizadores que miden las concentraciones de CO, COV y NO_x.

La primera diferencia entre estos métodos es que los valores de las mediciones por túnel de dilución siempre serán mayores a las medidas por el sistema de filtros calientes, dado que en la dilución se agrega la masa de parte de los COV que son capturados²⁸. A su vez el método de la EN 16510 contempla una medición de MP y gases procedentes de la combustión, entre estos los COV, por tanto, no es aplicable el método de túnel de dilución para medir el MP ya que afecta las mediciones de estos COV.

En el método de ensayo de la EPA se contempla la medición del volumen del gas de la combustión, por lo que es factible poder realizar un cálculo de emisiones con unidades mg/m³. A su vez, es posible también poder calcular las emisiones normalizando por la masa del combustible utilizada y por la energía suministrada. Considerando en todos estos casos que las emisiones serán mayores por efecto de los COV disueltos.

²⁸ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.0c04148>

En el método descrito en la EN 16510, no existe un problema en realizar los cálculos de las emisiones referentes a otras variables de normalización, ya que dentro de las mediciones está contemplada la masa del energético, el poder calorífico de este y el tiempo del ensayo.

Comparativa entre métodos

Los ensayos que utilizan el método de medición por medio un túnel de dilución y análisis gravimétrico, capturan las partículas sólidas de los humos de combustión, así como parte de los COV que son diluidos en el proceso, esto permite cuantificar emisiones cercanas a lo que ocurre en la atmosfera, ya que, en condiciones normales del funcionamiento, parte de lo COV que escapan de la chimeneas se condensan en el aire adicionando contaminación secundaria de MP²⁹. Mientras que los sistemas de filtros calientes se miden las emisiones no condensables de los humos, cuantificando únicamente los MP³⁰³¹. Por otro lado, las mediciones donde se utilizan estos filtros adicionan analizadores de gases que permiten cuantificar las emisiones de COV, pero los MP reales emitidos a la atmosfera quedan subestimados.

Referente a la aplicación de los métodos, los filtros gravimétricos son sencillos, precisos y permiten la medición de MP acumulada en un tiempo de ensayo. La recolección de las emisiones de MP es relativamente sencilla, pero el proceso de medición completo puede resultar engorroso, ya que se deben pre acondicionar los filtros y pesarse con alta precisión antes y después de cada testeo. El proceso suele durar al menos 24 horas, ya que cada filtro permite la medición única de la masa de MP de testeo, los cuales deben ser limpiados y pre acondicionado para realizar nuevas pruebas, debido a estos factores se generan cuellos de botella que ralentizan los tiempos de muestreo³². Por otro lado, los métodos de medición por concentración (como el indicado por la EU), requieren ajustar los caudales dentro del sistema de medición, para que estos permanezcan constantes durante el proceso completo, de tal forma que no se vean afectados los factores de emisión, además de requerir sistemas analizadores de gases para la cuantificación de CO, COV y NO_x.

Cada uno de los métodos establece sus condiciones para realizar la carga de combustible, destacando que en lo indicado por Australia y Nueva Zelanda se deben realizar para calefactores a leña, un total de 9 ensayos por equipo, misma situación para lo indicado por la EPA, mientras que en Chile se realizan cuatro ensayos en total, por modelo testado. Para calefactores a pellet, el método de Australia y Nueva Zelanda establecen un total de 6 testeos, La EPA solo un testeo por velocidad de combustión establecida, caso similar a lo estipulado en el método de Chile, que requiere una prueba por velocidad (según indicaciones del fabricante).

²⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021730396X?via%3Dihub>

³⁰ <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786828908959234>

³¹ <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/027868291004850>

³² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123003581>

Métodos en condiciones realistas.

Los métodos mencionados anteriormente dan cuenta de ciclos de funcionamiento que están diseñados para dar cumplimiento a las regulaciones establecidas por los mismos, sin embargo, no representan las condiciones reales de combustión de los equipos, por ejemplo, la forma de realizar el arranque de la estufa, el proceso de enfriamiento natural que tiene el sistema, la carga del combustible y otras transiciones en el curso de la combustión. Es por este motivo que se han desarrollado ciclos de prueba en laboratorios para calefactores que funcionen con combustibles sólidos, los cuales representen el proceso real del uso en los hogares, este método fue denominado beReal, el cual es un proceso preliminar para la realización de las pruebas. El método beReal está fundado en estudios realizados a cerca de 2.000 hogares europeos (Italia, Alemania, Austria y Suecia) que utilizan algún sistema de calefacción por medio de combustible sólidos³³, donde se les realizaron preguntas para identificar los ciclos y patrones de calefacción típicos. Los resultados del estudio revelaron que el 62% de los encuestados utiliza un calefactor individual de ambiente, un 65% de las viviendas realizan ajustes a la configuración de calor durante el funcionamiento (en equipos a pellet) y que un 53% de los hogares encuestado utiliza potencias intermedias de los equipos, en base a estos antecedentes el método beReal se desarrolló en base a evaluar el rendimiento de los calefactores en habitaciones de distintas configuraciones de salida de calor, así como incluir los procesos de encendido, quemado y otros fases recurrentes en la ejecución de los equipos (aspectos que no están considerado en los métodos convencionales). En base al modelo beReal la entidad “The Northeast States for Coordinated Air” (NESCAUM) desarrollaron el documento EPA ALT-140, con el objetivo de reflejar las prácticas operativas típicas de los hogares de Estados Unidos³⁴.

Este método alternativo EPA ALT-140 tiene como objetivo mejorar la eficacia de las pruebas de leña mediante un uso en condiciones realistas para los equipos a leña. Se realizan las mediciones para cuatro velocidades de combustión o fases, arranque, fuego alto, fuego mantenido y velocidad de combustión baja. La fase de fuego alta busca replicar el periodo en el que los propietarios desean calentar rápidamente un área después de encender o reiniciar el equipo, durante éste, se establece un pequeño lecho de brasas y se configura la entrada de aire completamente abierta. La fase de fuego mantenido busca simular el proceso de los usuarios para mantener una producción de calor constante, se establece un lecho de brasas mediano y una pequeña cantidad de leña que es quemado a fuego alto. La fase de combustión baja emula cuando el usuario pretende mantener la calefacción por un periodo largo, como durante la noche, para eso se genera un gran lecho de brasas con carga completa de leña y la configuración de aire al mínimo. Todas estas fases terminan cuando el 90% del combustible es consumido.

³³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916301076?via%3Dihub>

³⁴ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2022.2057615>

Tabla 24, Ventajas y desventajas del método de ensayo.

Método de ensayo	Ventajas	Desventajas
Túnel de dilución (EPA y Chile)	<ul style="list-style-type: none"> Permite la medición de MP en condiciones cercanas a las emisiones reales al ambiente³⁵. En la Figura 5 se muestra una gráfica que da cuenta del método de túnel de dilución es que representa de mejor forma la evolución de los humos de combustión para la determinación del MP. 	<ul style="list-style-type: none"> No incluye la medición de los gases de la combustión. Es un método que requiere mayor cuidado a la hora de realizar las mediciones.
Filtro caliente y analizador de gases (Países de Europa)	<ul style="list-style-type: none"> Incluye la medición de los gases de la combustión. El sistema de filtros utilizado permite una medición más simple. 	<ul style="list-style-type: none"> Los equipos para realizar las mediciones de gases costoso. Las mediciones de MP no reflejan el total de las emisiones de COV que no condensan a altas temperaturas.

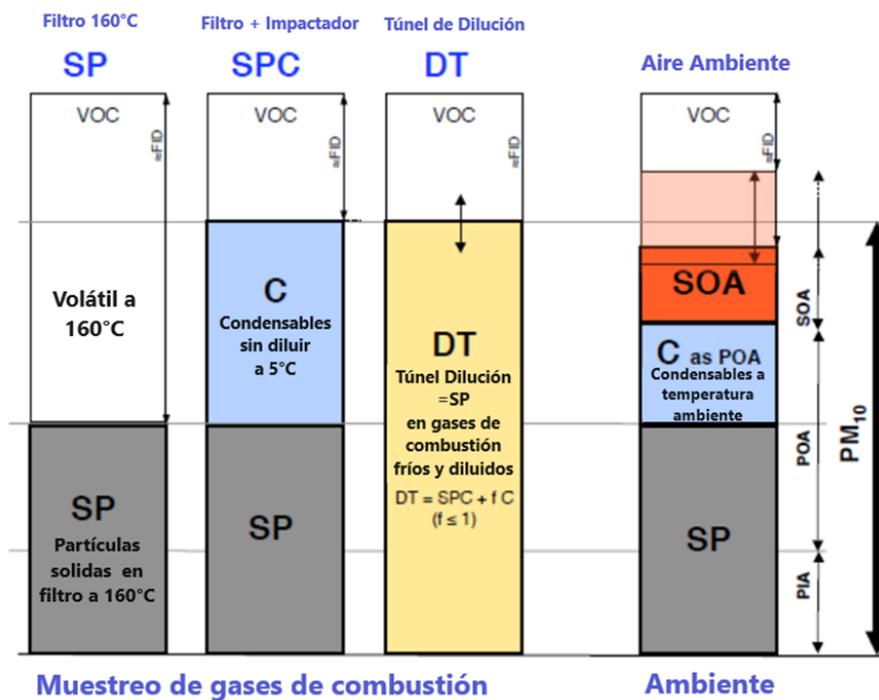


Figura 5, Comparison of Sampling and Ambient Conditions (Nussbaumer, 2008).

³⁵ https://czysteogrzewanie.pl/wp-content/uploads/2019/04/nussbaumer_biomass_emissions.pdf

6.22. Instalación de los equipos

En “Standards of Performance for New Residential Wood Heaters, New Residential Hydronic Heaters and Forced-Air Furnaces”³⁶ no se establecen requerimientos desde la normativa respecto la instalación de los calefactores, solo se incentiva a que las autoridades estatales de Estados Unidos a desarrollar requisitos para la instalación y operaciones de estos equipos.

Sin embargo, desde esta normativa se establecen mínimos que deben indicar los fabricantes en los manuales destinados a los propietarios, la cual debe ser la adecuada para permitir a los usuarios lograr un desempeño óptimo de los equipos. Además, las empresas deben disponer al usuario de los manuales actuales e históricos en el sitio web de la empresa.

Los aspectos acerca de la instalación de los calefactores que son indicados en la norma son los siguientes:

- Orientación sobre una instalación adecuada, altura del cañón o chimenea, ubicación del calefactor.
- Inclusión de dibujos del diseño y ensamblaje de los equipos, con las instrucciones de instalación y funcionamiento escritas.
- Debe indicar las condiciones para lograr un tiraje adecuado, inadecuado y excesivo.

Estufas de leña, insertos para chimeneas y chimeneas

La ley estatal de Oregón, para la ciudad de Portland “Wood Stoves, Fireplace Inserts and Chimneys (Brochure 4)”, establece el requerimiento de obtención de permisos para el uso de calefactores a leña³⁷ (estufas a leña, chimeneas y chimeneas empotradas), junto a la inspección y aprobación del Developmental Services.

Para instalaciones con paredes o techos de materiales combustibles, se requiere la instalación con la cara del calefactor en sentido contrario a la pared, dejando un espacio adecuado según lo indicado por el fabricante para equipos listados (examinados y aprobados por agencias reconocidas, tales como, UL, Underwriters Laboratories, Departamento de Calidad Ambiental (DEQ, por sus siglas en inglés) o Warnock-Hershey), de 36 pulgadas para estufas antiguas y de 48 pulgadas para estufas no listadas.

³⁶ <https://www.federalregister.gov/documents/2015/03/16/2015-03733/standards-of-performance-for-new-residential-wood-heaters-new-residential-hydronic-heaters-and>

³⁷ <https://www.portland.gov/bds/documents/estufas-de-leña-insertos-para-chimeneas-y-chimeneas-wood-stoves-fireplace-inserts-and/download>

Si se requiere que la estufa esté más cerca de las paredes, se debe instalar una de las siguientes paredes de protección:

- Hoja de metal, espaciada a una pulgada de la pared con espaciadores no combustibles y que permita una ventilación a lo largo de la parte de arriba y abajo.
- Tabla de aislamiento no combustible, de al menos media pulgada de grosor, que esté apoyada por un cuadro de meta y que permita una ventilación a lo largo de la parte de arriba y abajo.
- Pared de ladrillo, de al menos cuatro pulgadas de grosor, delante de una pared combustible, dejando un espacio de aire de una pulgada entre las dos paredes, esta debe tener aberturas en la parte de abajo y arriba para que el aire pude fluir.

En la Figura 6 se observa un diagrama que indica la instalación de la pared de protección para una estufa a leña, mostrando los separadores de la pared, los espacios de al menos una pulgada arriba y abajo que permitan el flujo de aire y algunas indicaciones de otros materiales combustibles dentro del hoja, como cortinas y muebles, que deben estar a una distancia segura de los calefactores.

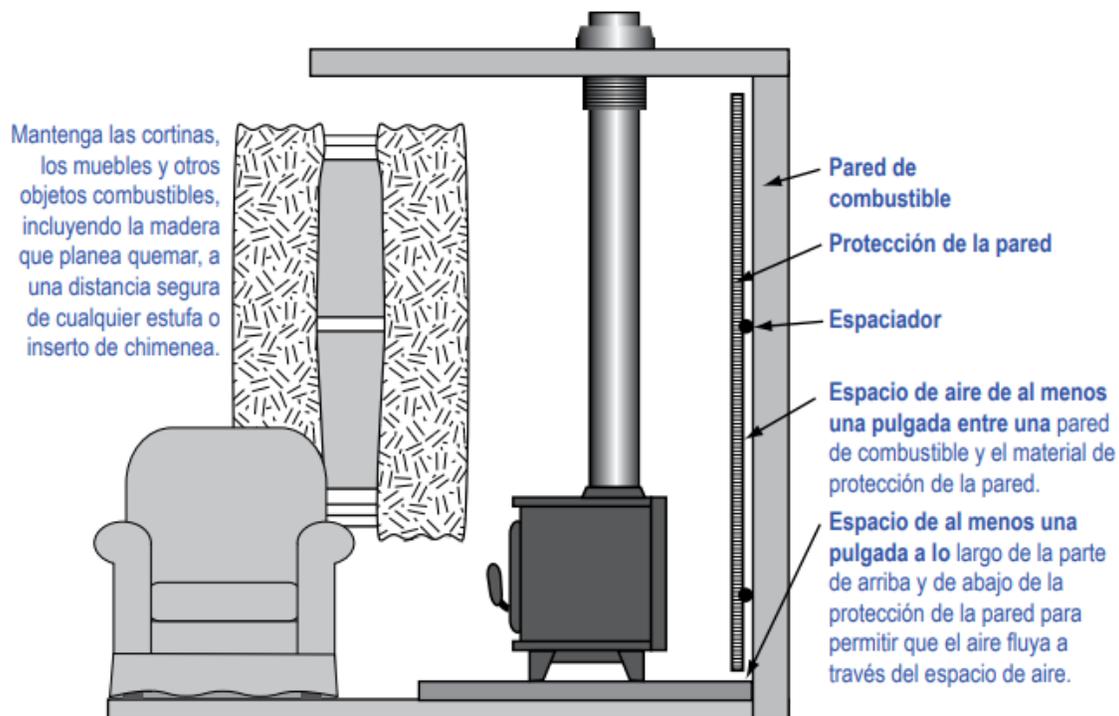


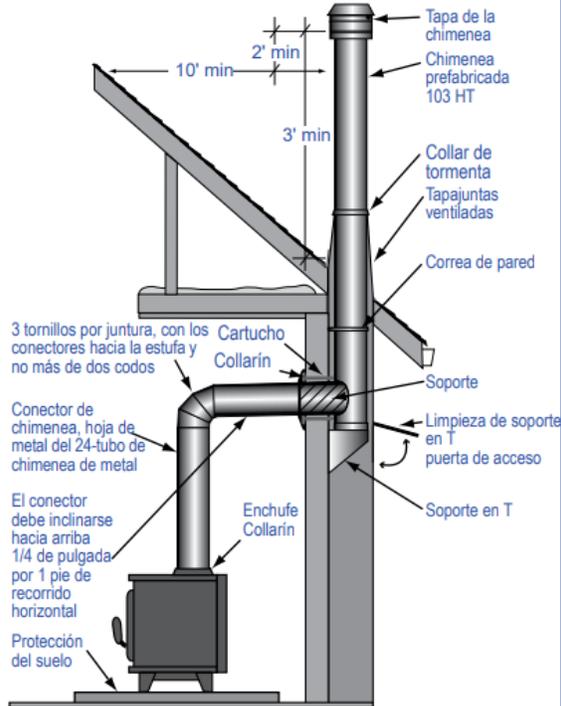
Figura 6, diagrama de instalación con pared de protección³⁸.

³⁸ <https://www.portland.gov/bds/documents/estufas-de-leña-insertos-para-chimeneas-y-chimeneas-woodstoves-fireplace-inserts-and/download>

Esta ley da cuenta de las diferentes instalaciones de la chimenea o cañón prefabricados de las estufas, para chimeneas que atraviesen la pared, se debe instalar un conector desde la estufa a la pared donde está el tubo de la chimenea, mientras que para chimeneas que atraviesen el techo de la vivienda, se debe realizar la instalación directamente, manteniendo las consideraciones del punto anterior, respecto a las protecciones de la pared. Todo este detalle se muestra en la Figura 7, donde en el diagrama de la izquierda se muestra la primera situación mencionada, de conexión de la chimenea hacia la pared, mientras que, en el diagrama de la derecha, se muestra la conexión directa para una chimenea que atraviesa el techo, además de indicar en cada caso, los parámetros específicos requeridos en cada instalación.

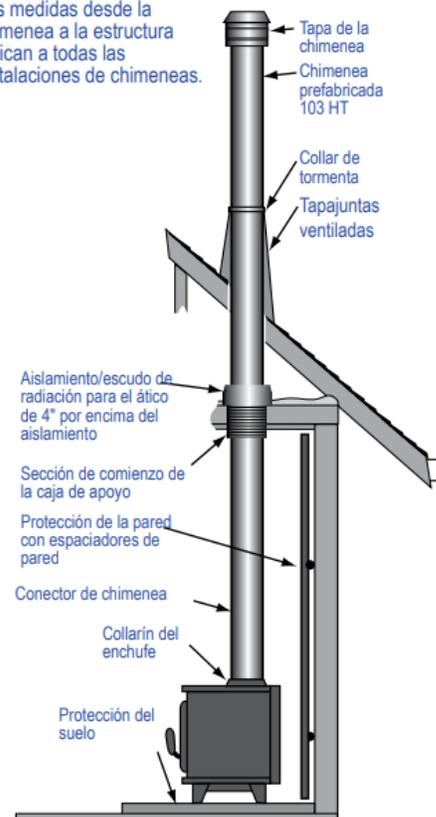
Chimeneas prefabricadas

La parte superior de la chimenea debe ser al menos 2 pies más alta que cualquier otra parte de la estructura que esté a menos de 10 pies de la chimenea y un mínimo de 3 pies de altura medidos desde donde atraviesa el tejado.



Utilícela cuando la chimenea atraviesa la pared exterior y está envuelta y apoyada por un soporte, mantenga la distancia requerida hasta los materiales de construcción.

Las medidas desde la chimenea a la estructura aplican a todas las instalaciones de chimeneas.



Utilice para casas de un piso con ático, donde la chimenea está apoyada por el techo, mantenga la distancia requerida hasta los materiales de construcción.

Figura 7, Diagrama de conexión de la chimenea o cañón, a la izquierda una instalación con conexión de chimenea que atraviesa la pared y a la derecha una instalación con conexión directa que atraviesa el techo³⁹.

³⁹ <https://www.portland.gov/bds/documents/estufas-de-lena-insertos-para-chimeneas-y-chimeneas-woodstoves-fireplace-inserts-and/download>

6.23. Instrumentos de gestión ambiental y experiencias internacionales para la reducción de emisiones de contaminación procedentes de la calefacción a leña y sus derivados.

Diversas ciudades, especialmente en Europa, implementan programas destinados a fomentar la sustitución de estufas y calderas antiguas, que son fuente de contaminación, por equipos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. El propósito de estos dispositivos modernos es mitigar las emisiones de gases perjudiciales y partículas mediante la aplicación de tecnologías avanzadas. Estos programas se fundamentan en:

1. **Incentivos y subsidios para energías limpias:** En los cuales algunos gobiernos proporcionan un estímulo económico y subsidios a quienes optan por fuentes de energía más limpias para la calefacción, como lo son los sistemas de calefacción solar, bombas de calor o calderas de biomasa, promoviendo la transición hacia prácticas energéticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.
2. **Programas de educación y concienciación:** Estos programas tienen como principal objetivo aumentar la conciencia entre la población acerca de las repercusiones negativas derivadas de ciertas prácticas de calefacción. Estos programas buscan fomentar una adopción más responsable y eficiente de los sistemas de calefacción, educando a la comunidad sobre la correcta manera de utilizar estufas y chimeneas que funcionan a base de madera, destacando pautas esenciales para minimizar la emisión de contaminantes y maximizar la eficiencia en la combustión. Asimismo, se promueve activamente la transición hacia sistemas de calefacción más limpios y sustentables, buscando crear un cambio en los patrones de comportamiento en relación con la calefacción e incentivando a las personas a tomar decisiones informadas y conscientes que beneficien tanto al medio ambiente como a la calidad de vida de la población en general.
3. **Programas de renovación y aislamiento de edificios:** Promover la eficiencia energética en construcciones puede disminuir la necesidad de calefacción y, por lo tanto, las emisiones asociadas. Esta idea puede ser potenciada junto con la idea del programa de incentivos y subsidios para energías limpias
4. **Monitoreo de la calidad del aire:** Establecer una red de monitoreo de la calidad del aire en zonas urbanas y suburbanas permite detectar áreas con problemas de contaminación relacionados con la calefacción y diseñar programas específicos para abordar esas áreas de manera más eficaz.
5. **Restricciones de uso:** En algunos lugares, se implementan restricciones en el uso de estufas y calderas contaminantes durante ciertos períodos del año o en condiciones climáticas específicas para reducir las emisiones y la concentración de contaminantes en el aire.

El detalle se encuentra en ANEXO 14.3.

7. Etapa 2: Caracterizar el mercado nacional de los artefactos que combusionen o puedan combusionar leña y derivados de leña y pellet de madera.

Para caracterizar el mercado de los calefactores a combustión de leña/pellet es importante dar cuenta de la cantidad de viviendas que utilizan estos combustibles, para esto se utilizó como primera fuente de información los resultados de la encuesta CASEN 2022, que es la información más actualizada a la fecha respecto a información de calefacción y cocción en los hogares chilenos. En esta encuesta se realizaron las siguientes preguntas:

- v34a. ¿Qué combustible o fuente de energía usa habitualmente para cocinar?
- v34b. ¿Qué combustible o fuente de energía usa habitualmente para calefactar?

Cuyos resultados analizados por número de viviendas a nivel regional muestran los siguientes resultados:

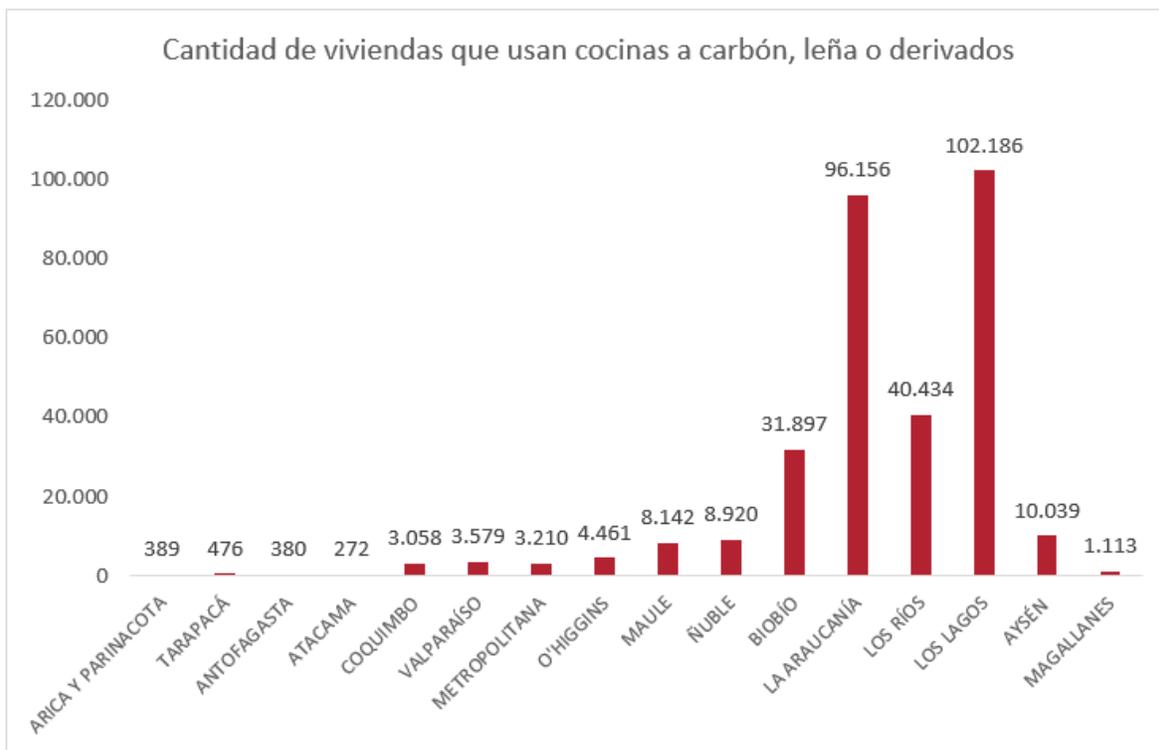


Figura 8, Cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para cocinar.

Según estos resultados, existen más de 300.000 viviendas en Chile que utilizan la leña o sus derivados para la cocción de alimentos, correspondientes a 793.362 habitantes del país (variable en la que están expresados los resultados del estudio), este valor ha disminuido respecto a la anterior encuesta CASEN 2017 donde el resultado fue de 1.156.174 habitantes.

Mostrando una disminución en el uso de cocinas a leña a nivel nacional, que según los resultados y la experiencia del equipo Consultor, se deben en su mayor parte por el cambio a cocinas a gas.

Las regiones de la Araucanía y Los Lagos son donde más se cocina utilizando leña o sus derivados, correspondiente al 63% del uso de estos artefactos a nivel nacional.

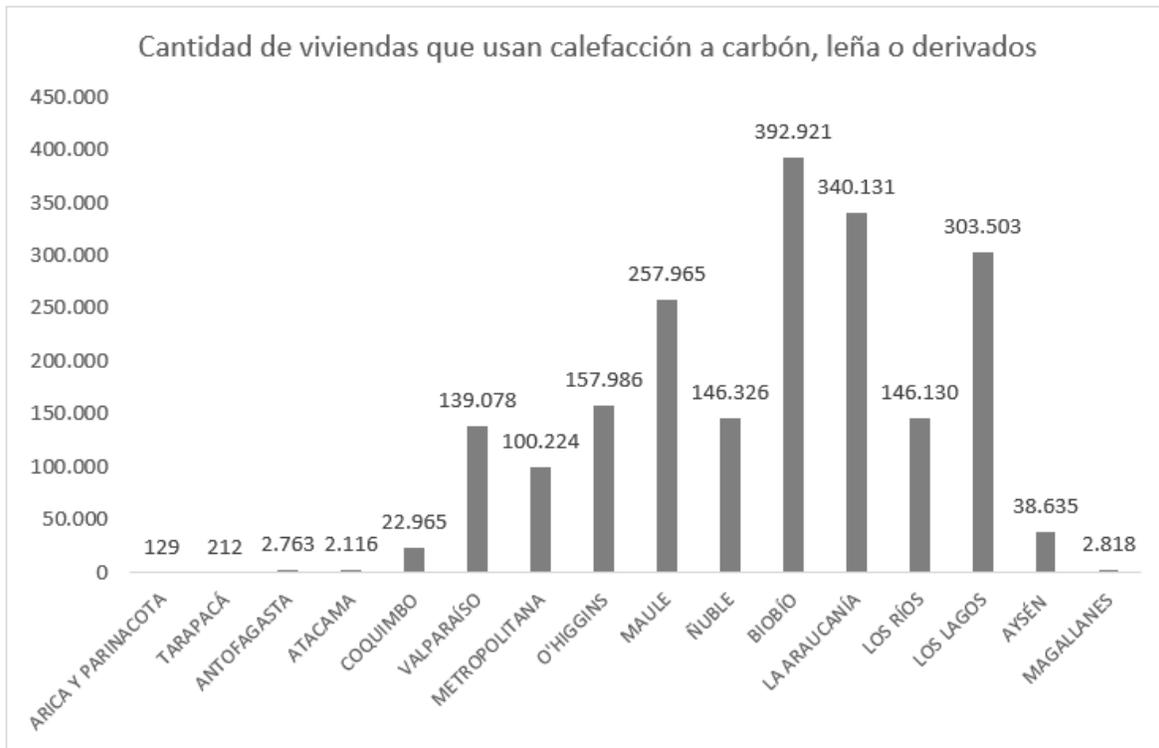


Figura 9, Cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para la calefacción.

Respecto a la calefacción a leña y sus derivados, esta se encuentra presente en poco más de 2.000.000 de viviendas, centradas mayoritariamente en las regiones de Biobío, La Araucanía, Los Lagos y el Maule, mientras que en porcentaje de cada región en particular, existe un mayor porcentaje de cocinas a leña en La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén (Tabla 26), con sobre del 80% de la población. Estos resultados corresponden a 5.253.266 de habitantes que usan leña o sus derivados como energético para calefaccionar, número que no ha cambiado significativamente desde la última encuesta CASEN en 2017, donde la cantidad fue de 5.353.372 habitantes que declaran el mismo medio de calefacción, mostrando que el uso de leña para calefaccionar no ha sufrido cambios significativos en los últimos 5 años.

Tabla 25, Detalle de la cantidad de viviendas que utilizan leña o sus derivados para cocinar y calefaccionar y el porcentaje que representan respecto al total de viviendas de la región⁴⁰.

Región de Chile	N° de viviendas Calefacción	% del total	N° de viviendas Cocina	% del total	Total de viviendas
ARICA Y PARINACOTA	129	0,1%	389	0,4%	87.572
TARAPACÁ	212	0,1%	476	0,3%	143.124
ANTOFAGASTA	2.763	1,2%	380	0,2%	230.804
ATACAMA	2.116	1,6%	272	0,2%	135.007
COQUIMBO	22.965	6,5%	3.058	0,9%	354.035
VALPARAÍSO	139.078	15,9%	3.579	0,4%	873.489
METROPOLITANA	100.224	3,6%	3.210	0,1%	2.798.094
O'HIGGINS	157.986	40,1%	4.461	1,1%	394.273
MAULE	257.965	56,4%	8.142	1,8%	457.514
ÑUBLE	146.326	69,6%	8.920	4,2%	210.274
BIOBÍO	392.921	63,4%	31.897	5,1%	619.487
LA ARAUCANÍA	340.131	83,1%	96.156	23,5%	409.413
LOS RÍOS	146.130	88,8%	40.434	24,6%	164.526
LOS LAGOS	303.503	83,3%	102.186	28,0%	364.545
AYSÉN	38.635	82,3%	10.039	21,4%	46.953
MAGALLANES	2.818	3,9%	1.113	1,6%	71.818

Respecto al tipo de calefactores utilizados por región o zona del país, debemos referirnos en primera instancia al estudio “MEDICIÓN DEL CONSUMO NACIONAL DE LEÑA Y OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DERIVADOS DE LA MADERA”⁴¹, realizado por CDT en 2015 para el Ministerio de Energía, en el cual se realizó un levantamiento con carácter probabilístico por medio de encuestas de 4.015 casos a lo largo del país.

A nivel nacional el tipo de calefactor a leña más utilizado levantado en este estudio, fueron los de cámara doble (que cabe mencionar, solo corresponden a artefactos con un templador, pero que culturalmente se conocer como cámara doble), con un 51.6% del total, siguiendo las cocinas a leña con un 16,7%, en la Figura 10 se muestra un gráfico con la distribución total.

⁴⁰ Encuesta CASEN 2022.

⁴¹ <https://calefaccionsustentable.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/Medicion-del-consumo-nacional-de-leña-y-otros-combustibles-sólidos-derivados-de-la-madera.pdf>

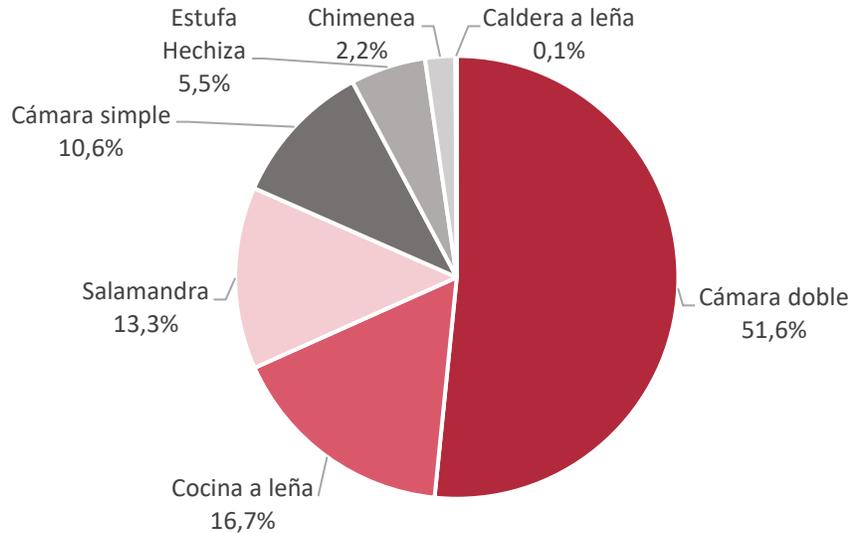


Figura 10, Distribución de uso de artefactos a leña a nivel nacional en el sector residencial. Fuente: CDT, 2015.

El resultado específico de cada región se muestra en la Tabla 26, en la cual se observa un uso mayoritario de estufas a doble cámara salvo en la región de Aysén, donde las cocinas a leña son mayoritarias. A su vez se nota un mayor uso de cocinas a leña en las regiones de Los Ríos, Los Lagos y Aysén.

Tabla 26, Uso de artefacto a leña por región en el sector residencial. Fuente: CDT, 2015.

	ZN	V	RM	VI	VII	VIII	IX	XIV	X	XI	XII	Total
Cámara Doble	74,9%	43,8%	60,8%	37,0%	56,6%	51,3%	57,6%	44,4%	49,4%	35,8%	48,6%	51,5%
Cocina a leña	10,0%	0,0%	1,4%	11,3%	12,0%	14,7%	18,4%	35,9%	28,6%	38,3%	7,8%	16,6%
Salamandra	2,5%	25,7%	20,6%	26,7%	12,6%	16,6%	10,8%	4,3%	3,0%	1,3%	22,6%	13,5%
Cámara simple	0,0%	19,6%	11,7%	11,1%	8,7%	8,2%	6,4%	10,0%	16,9%	23,7%	21,1%	10,6%
Equipo Hechizo	7,2%	8,8%	4,7%	9,9%	7,1%	6,3%	5,2%	3,4%	1,2%	0,0%	0,0%	5,5%
Chimenea	5,0%	2,2%	0,8%	4,1%	3,1%	2,9%	1,7%	1,2%	0,5%	0,0%	0,0%	2,2%
Caldera a Leña	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,4%	0,0%	0,0%	0,1%
Total	42.017	100.835	145.870	165.372	234.279	459.243	292.255	133.164	254.569	38.505	7.694	1.873.804

Estos datos fueron actualizados por SISTAM al año 2017 en el estudio "INVENTARIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS, DESDE LA REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS HASTA LA REGIÓN DE LOS LAGOS", donde con los datos del estudio de CDT 2015, SICAM 2016 y datos actualizados del programa de recambio calefactores, se dio con la siguiente distribución de tipo de calefactor:

Tabla 27, Uso de artefacto a leña por región en el sector residencial. Fuente: SISTAM, 2017.

	Región de O'Higgins	Región del Maule	Región del Ñuble	Región del Biobío	Región de la Araucanía	Región de los Ríos	Región de los Lagos
Calefactor con templador	39,26%	56,26%	51,16%	51,24%	56,77%	44,20%	49,17%
Cocina a leña	11,61%	11,90%	14,68%	14,69%	17,95%	35,84%	28,55%
Salamandra	21,46%	12,49%	16,55%	16,58%	10,57%	4,25%	2,95%
Calefactor Cámara simple	9,87%	8,45%	8,16%	8,18%	5,47%	9,94%	16,82%
Equipo Hechizo	14,00%	6,67%	5,95%	6,14%	5,08%	2,90%	0,63%
Chimenea	3,23%	3,09%	2,90%	2,90%	1,69%	1,20%	0,50%
Caldera a Leña	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,80%	0,40%
Calefactor certificado	0,00%	0,00%	0,24%	0,18%	1,37%	0,68%	0,74%
Calefactor a pellet	0,45%	1,15%	0,36%	0,09%	1,10%	0,19%	0,25%
Total %	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Total	165.494	234.734	192.859	266.690	293.462	133.359	254.979

No se observa una disminución significativa en la distribución del tipo de calefactor a combustible sólido, dada la gran magnitud de viviendas que los utilizan (cerca de 2 millones). Pero eso no significa que un aumento en la cantidad de recambios sostenida no pueda generar un recambio acelerado de equipos antiguos.

El uso de los calefactores a leña se concentra en los meses de invierno, siendo en las regiones del sur del país donde más horas se utilizan, el detalle se muestra en la Tabla 28, en la que se muestra el promedio de horas que se utilizó la calefacción a leña durante el año 2015, este resultado sirve para dar una base del uso, sin embargo, es probable que estos datos hayan cambiado en los últimos años, producto de inviernos más cortos como lo visto en el estudio "CATASTRO DE EMISIONES DE CALEFACTORES Y COCINAS"⁴² donde en la región Metropolitana se midió para el año 2022 un uso de 516 horas de calefacción a leña al año, resultado que es cerca de tres veces menos a lo medido por CDT en el 2015.

⁴² <https://airerm.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/07/INFORME-FINAL-CATASTRO-DE-EMISIONES-DE-CALEFACTORES-Y-COCINAS-AMPLIACION.pdf>

Tabla 28, detalle de las horas de uso promedio de la calefacción a leña y los kg promedio de leña utilizados en el año 2015.
Fuente: CDT, 2015.

Región del país	Horas promedio h/año	Leña utilizada promedio por vivienda kg/año
ZONA NORTE	521	436
VALPARAÍSO	1.505	1.190
METROPOLITANA	2.008	1.691
O'HIGGINS	1.937	1.586
MAULE	1.664	1.414
BIOBÍO	1.801	2.107
LA ARAUCANÍA	2.643	2.913
LOS RÍOS	4.020	5.404
LOS LAGOS	4.369	5.214
AYSÉN	5.371	11.980
MAGALLANES	7.669	5.404

7.1. Artefactos a leña y pellet comercializados a nivel nacional

En el país, la mayor cantidad de equipos que combustonan leña o pellet son utilizados para calefacción, como estufas, cocinas a leña (como medio de calefacción), chimeneas, termo estufas y calderas⁴³.

Parte de estos equipos deben contar con certificación de seguridad, eficiencia energética y emisiones de MP, por parte de la SEC para su comercialización⁴⁴. Otros artefactos están fuera de norma y no requieren certificación, como cocinas a leña, y equipos de más de 25 kW de potencia (ya que la norma no establece estándares de emisiones para equipos por encima de esta potencia), mientras que otros simplemente no se certifican y se comercializan en el mercado informal, como las denominadas estufas hechizas y salamandras.

De esta forma es posible encontrar la documentación de los equipos que están certificados por la SEC, los cuales representan gran parte del mercado de los calefactores utilizados, según lo mostrado en la Figura 10.

Las principales empresas que comercializan equipos certificados a leña son Amesti, Bosca, Nouva⁴⁵, donde en base a lo que es posible encontrar en sus páginas web, se resumen sus características en la Tabla 29. En general todas las estufas de una marca cuentan con

⁴³https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf

⁴⁴ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1042254&idParte=&idVersion=>

⁴⁵ Modelos de equipos certificados por la SEC, <https://www.sec.cl/calefactores-a-lena/>

características similares respecto a la materialidad y tecnologías de control de emisiones, solo se diferencian entre modelos por el precio y la potencial del equipo.

Estas estufas comercializadas, cuentan con sistemas que mejoran el aislamiento de estas, como recubrimientos de vermiculita y/o ladrillos refractarios para reflejar el calor interno, puertas con vidrios termo cerámicos, que permiten ver el interior de la cámara de combustión y mantienen aislado el sistema, templadores y entradas de aire controladas. Este último corresponde a la capacidad que tienen los equipos para suministrar la cantidad de aire requerida para realizar una correcta combustión, reduciendo las emisiones por combustión insuficiente. Otro aspecto de diseño con el que cuentan estos equipos son los templadores, que corresponden a un material que calienta aire para generar una combustión de mejor calidad. En la actualidad se publicita como un mecanismo de doble cámara, el cual corresponde realmente a la existencia de una cámara extra dentro del calefactor, donde se precalienta el aire que luego es adicionado posterior a la primera combustión, disminuyendo las emisiones provenientes de la quema de la leña.

Tabla 29, Resumen características de los principales equipos a leña certificados comercializados en Chile.

Estufa	Tecnología aplicadas	Precio	Material
Estufas a LEÑA BOSCA	<ul style="list-style-type: none">• Sistema de doble combustión a través de un Templador• Cristal cerámico• Recubrimiento interior con 3 placas de vermiculita para reflejar el calor Controlador de entrada de aire, consumiendo menos leña y generando más calor ⁴⁶	Entre \$369.990 y \$599.990	<ul style="list-style-type: none">• Acero
Estufas a LEÑA AMESTI	<ul style="list-style-type: none">• Revestimiento Mineral Bioecocalórico - Lateral y Posterior /Ladrillos refractarios• Templador mineral Bioecocalórico / desmontable• Vidrios autolimpiantes, termo cerámicos• Inyector de Aire: Acelera el encendido reduciendo las emisiones contaminantes.• Doble combustión a una temperatura superior de 600°C. No hay posibilidad de ajustar el tiraje para "ahogar" la llama. ⁴⁷	Entre \$349.900 y \$599.900	<ul style="list-style-type: none">• Acero• Recubierta vermiculita

⁴⁶ <https://www.bosca.cl/calefaccion-y-climatizacion/calefactores-y-estufas-a-lena?page=2>

⁴⁷ <https://www.amesti.cl/content/45-estufas-a-lena>

Los equipos a pellet certificados que son comercializados contemplan una mayor distribución de actores, los cuales según datos de la SEC⁴⁸ y el estudio de ATS de 2021⁴⁹, dan cuenta de cerca de 57 marcas distintas de equipos.

Dado esta cantidad de marcas y la disponibilidad de información encontradas en las páginas web, se detallan características de algunos de los equipos a pellet certificados que son comercializados se muestra en la Tabla 30. En general los equipos a pellet son más costosos que los equipos a leña, pero disponen de una gran oferta de marcas y modelos. Para lograr el funcionamiento de los equipos a pellet es requerida la inyección de aire para la combustión, este aspecto permite regular la potencia de los equipos y a su vez, la tasa de emisión dadas las calidades de la combustión, por tanto, algunos equipos cuentan con sistemas que regulan la potencia a los requerimientos de temperatura del ambiente que están calefaccionando, evitando la interferencia del usuario lo que puede afectar a las emisiones del calefactor. Otros desarrollos de los equipos se han realizado desde la aislación y tratamiento de los gases, cómo sistema catalizadores para la eliminación de contaminantes y filtros. Cabe mencionar que al ser equipos que son importados al país, son equipos que cumplen con los estándares de los países de principal comercialización, como lo es Europa y Estados Unidos.

Tabla 30, Resumen características de los equipos a pellet certificados comercializados en Chile.

Estufa	Tecnología aplicadas	Precio	Material
Estufas a PELLET ALCAZAR	<ul style="list-style-type: none">• Evacuación de gases trasera• Vidrio termo cerámico Termostato Ambiental ⁵⁰	\$1.028.900 \$1.454.900	- No informado
Estufas a PELLET AMESTI	<ul style="list-style-type: none">• Termostato incorporado, se activa a los 70 °C.• Salida de humos posterior y/o superior• Sonda de humos• Deflector• Revestimiento lateral y posterior Difusor ⁵¹	\$799.900 \$2.499.900	- No informado
Estufas a PELLET ARTEL	<ul style="list-style-type: none">• Termostato incluido• 2 ventiladores silenciosos de convección de aire caliente• Vidrio cerámico con sistemas de autolimpieza	\$960.000 \$1.990.000	- No informado

⁴⁸ Modelos de equipos certificados por la SEC, <https://www.sec.cl/calefactores-a-lena/>

⁴⁹ EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALEFACTORES: EVALUACIÓN DE IMPACTO TÉCNICO-ECONÓMICO-SOCIAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTÁNDARES MÍNIMOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN NUEVOS CALEFACTORES QUE COMBUSTIONAN LEÑA Y PELLET PARA USO RESIDENCIAL. ATS, 2021.

⁵⁰ <https://www.alcazar.cl/index.php?route=product/category&path=63>

⁵¹ <https://www.amesti.cl/content/46-estufas-a-pellet>

Estufa	Tecnología aplicadas	Precio	Material
	Cámara de combustión y brasero de Hierro fundido refractario ⁵²		
Estufas a PELLET BOSCA	<ul style="list-style-type: none"> • Paneles vitrocerámica, que evita la dilatación térmica y resistentes al calor Doble combustión ⁵³	\$779.990 - \$1.199.990	Acero
Estufas a PELLET RAVELLI	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema RDS integrado • Parte superior de mayólica • Cámara de combustión de FIREX 600 • Puerta con cristal vitrocerámico • Calefacción con ventilador tangencial o frontal Crono termostato de serie ⁵⁴	Entre 4.464 USD + IVA y 5.895 USD + IVA	Acero
Estufas a PELLET TOYOTOMI	<ul style="list-style-type: none"> • Timer de encendido y apagado semanal • Función Eco • Función Sleep • Puerta interior sellada con fibra de vidrio • Sistema de combustión de Tiro Forzado • Termostato digital, Sensor sobrecalentamiento Ventilador integrado ⁵⁵	\$899.990 - \$1.199.990	No informado
Estufas a PELLET KHONE	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia cerámica • Resistencia térmica • Motor de ventilación frontal Modo Eco: Se activa al alcanzar la temperatura deseada apagado automático ⁵⁶	\$989.990 - \$5.970.000	Cámara de combustión de acero/ hierro fundido

Parte importante de este levantamiento es analizar el desempeño de los calefactores con certificación, de esta forma y con datos suministrados por la SEC se realizó el análisis de los equipos que han sido certificados en los últimos años, en términos de potencia, emisiones y magnitud del mercado. Este análisis representa una aproximación cercana a la cantidad de equipos que cuentan con certificación que son comercializados por año dentro del país.

⁵² <https://www.biomass.cl/categoria-producto/estufas-a-pellets/>

⁵³ <https://www.bosca.cl/calefaccion-y-climatizacion/calefactores-y-estufas-a-pellet>

⁵⁴ <https://esp.ravelligroup.it/cat/74-stufe/>

⁵⁵ <https://toyotomi.cl/product-category/calefaccion/>

⁵⁶ <https://www.khone.com/productos/calefaccion/estufa-pellet.html>

7.1.1. Vida útil de los calefactores

La vida útil de los calefactores a leña y pellet es un valor referencial indicado por los fabricantes, que se basa en estimaciones de durabilidad de los materiales, con y sin mantenciones.

Se nos ha indicado en reuniones con proveedores de estos artefactos, valores para la vida útil superiores a 10 años, que con la realización de mantenciones se puede extender hasta los 25 años. Sin embargo, estos valores son referenciales y pueden diferir de la realidad.

7.1.2. Cantidad de equipos certificados

Al sumar la cantidad de equipos que han sido certificados en los últimos 5 años, se observó que en promedio se certifican cerca de 100.000 unidades por año, de los cuales, entre un 55% y 70% corresponden a calefactores a leña, el porcentaje restante de calefactores a pellet, como se puede observar en la Figura 11, cabe mencionar que el dato para el año 2023 es menor dado que no se cuenta con el dato completo (datos hasta agosto de 2023)⁵⁷. La tendencia no muestra un aumento significativo o paulatino en la cantidad de equipos que son certificados, indicando un equilibrio respecto al mercado.

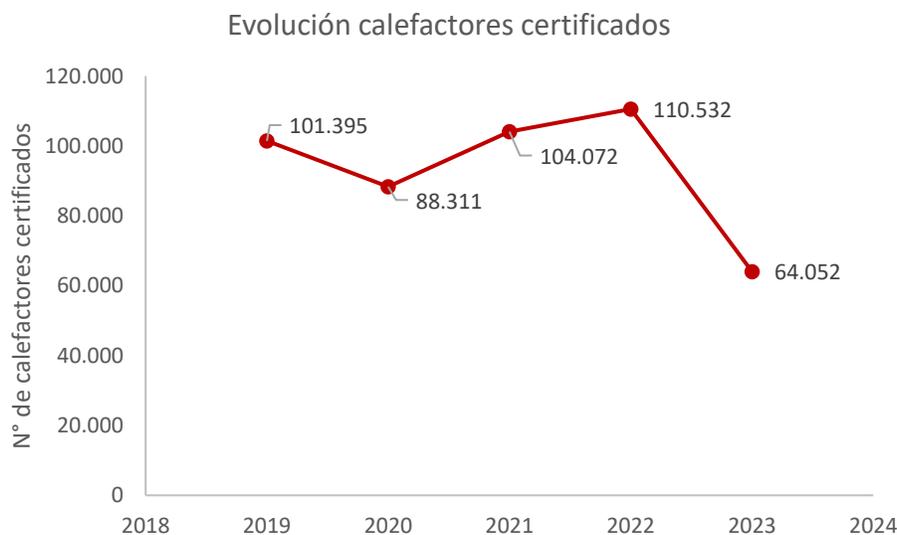


Figura 11, Evolución de la cantidad de calefactores a leña y pellet certificados, para los últimos cinco años.

A su vez es posible contar con la evolución específica para los calefactores a leña en la Figura 12 y para los calefactores a pellet en la Figura 13.

⁵⁷ Datos no públicos, suministrados por la SEC

Evolución calefactores a leña

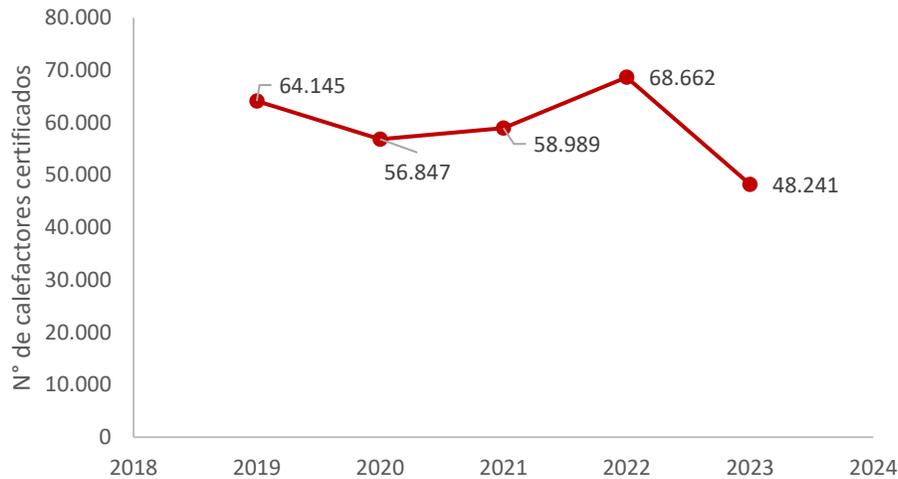


Figura 12, Evolución de la cantidad de calefactores a leña certificados, para los últimos cinco años.

Evolución (Pellet)

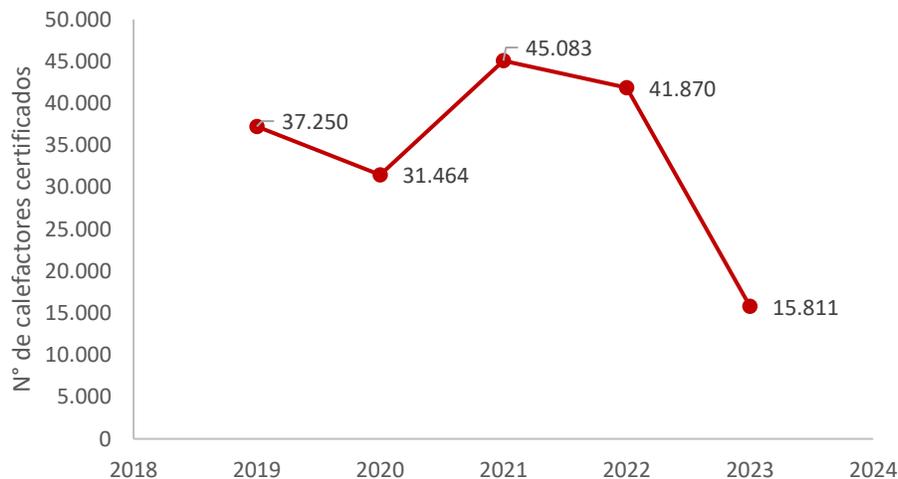


Figura 13, Evolución de la cantidad de calefactores a pellet certificados, para los últimos cinco años.

La participación de las empresas que comercializan estos productos en el mercado nacional da cuenta de la presencia de tres competidores en la venta de calefactores a leña, donde dos de estos se reparten el 99% del mercado (Figura 14), mientras que, para los calefactores a pellet, existe una mayor cantidad de empresas que participan en la venta de este tipo de artefactos (Figura 15). Cabe mencionar que el mercado de calefactores a leña lo componen empresas con fabricación nacional, mientras que los equipos a pellet son completamente de importación (equipos ensamblados y por partes para ensamblar en Chile), esto explica el porqué de la mayor cantidad de empresas que comercializan con estufas a pellet, esto facilita la adquisición de equipos para su venta.

Distribución del mercado de calefactores a leña

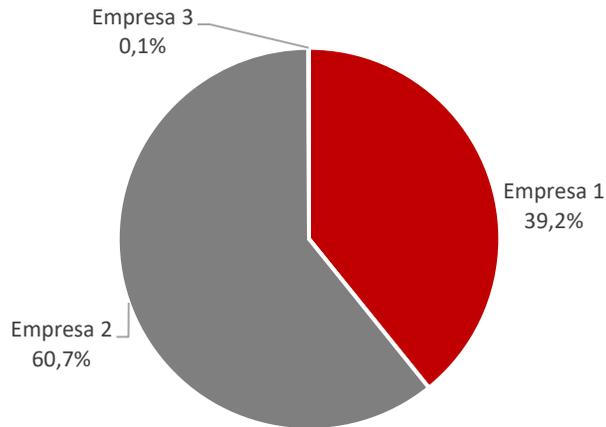


Figura 14, Distribución de la cantidad de calefactores a leña certificados por empresa.

Distribución del mercado de calefactores a pellet

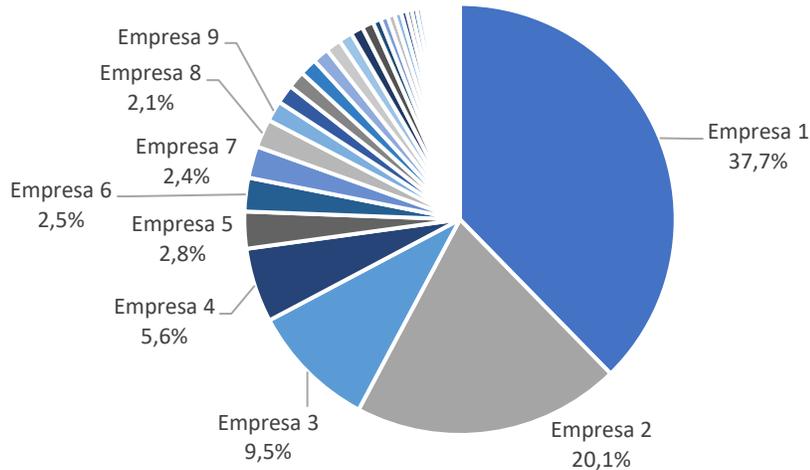


Figura 15, Distribución de la cantidad de calefactores a pellet certificados por empresa.

Estos calefactores cuentan con una variedad de modelos los cuales cuentan con distintas potencias térmicas asociadas, de esta forma y dada la normativa de emisiones actual, que establece diferencias para los calefactores que se encuentren en ciertos rangos de potencia, se analizó la distribución de estos respecto a los rangos establecidos por la norma. En la Figura 16 se muestra el porcentaje de equipos a leña y pellet que fueron certificados en los últimos cinco años, respecto al rango de potencias donde se encuentran, indicando que la mayor cantidad de artefactos se ubican entre los 8kW y 14kW de potencia, con un 68,8% del total, seguido de los calefactores de hasta 8kW con un 30,5% y por último los que se

encuentran en el rango de potencias mayor, de entre 14kW y 25kW, con un 0.7%. Estos resultados dan cuenta de que el segmento de calefactores de potencias “medias” son los más comercializados a nivel nacional, tanto a leña como a pellet. En la Figura 17 se muestra el detalle de la cantidad de equipos certificados por energético y rango de potencias.

Distribución de calefactores por rango de potencias

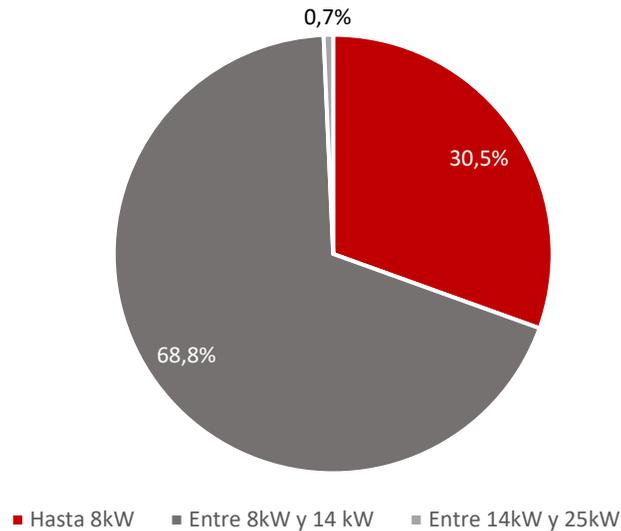


Figura 16, Distribución de los calefactores certificados en los últimos cinco años, por rango de potencias establecido en la normativa.

Cantidad de equipos certificados por rango de potencia

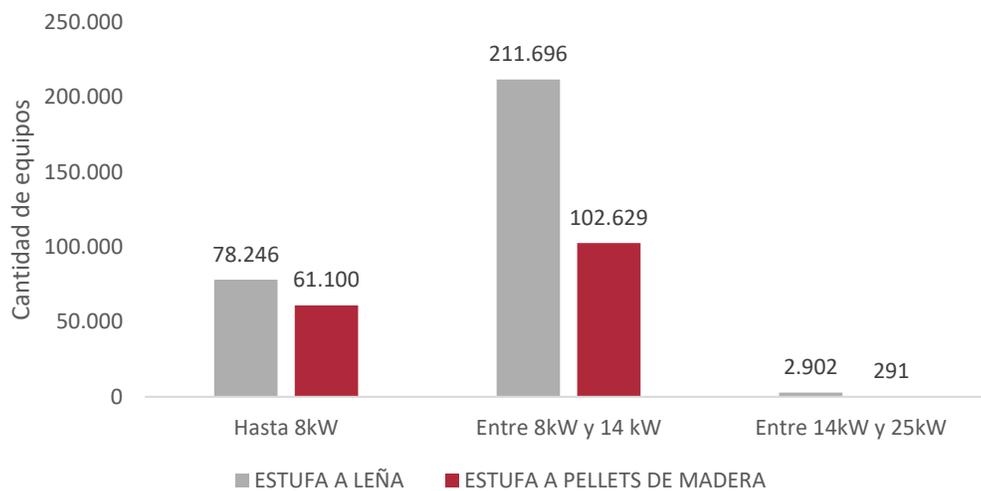


Figura 17, Cantidad de equipos a leña y pellet certificado en los últimos cinco años, por rango de potencia.

7.1.3. Emisiones de los calefactores certificados

Se analizaron las emisiones asociadas a los calefactores a leña y pellet que han sido sometidos a procesos de certificación en los últimos cinco años (en la Figura 20 se muestran fotos de modelos de calefactores a leña certificados), evaluando el efecto en la potencia del calefactor y las emisiones de estos, los resultados mostraron que no existe una relación entre estas dos variables, es más, parece indicar que las emisiones de los calefactores se mantienen dentro de unos rangos que no se ven afectados por la potencia del equipo. Este resultado se presume por efectos del dimensionamiento de los calefactores, donde equipos de mayor potencia tienen cámaras de combustión de mayor volumen, lo que favorece a la permanencia de los humos de la combustión, generando menor emisión en su uso, por tanto existe una variable diferente a lo normado que influye en las emisiones de los calefactores. En la Figura 18 se muestra una gráfica de emisiones vs potencia para los calefactores a leña, donde se aprecia que las emisiones de estos oscilan en un rango de entre 1,4 g/h y 3,1 g/h, mientras que en la Figura 19 se muestran los resultados del mismo análisis para los calefactores a pellet, donde se observa una dispersión mayoritaria entre 1g/h y 3g/h.

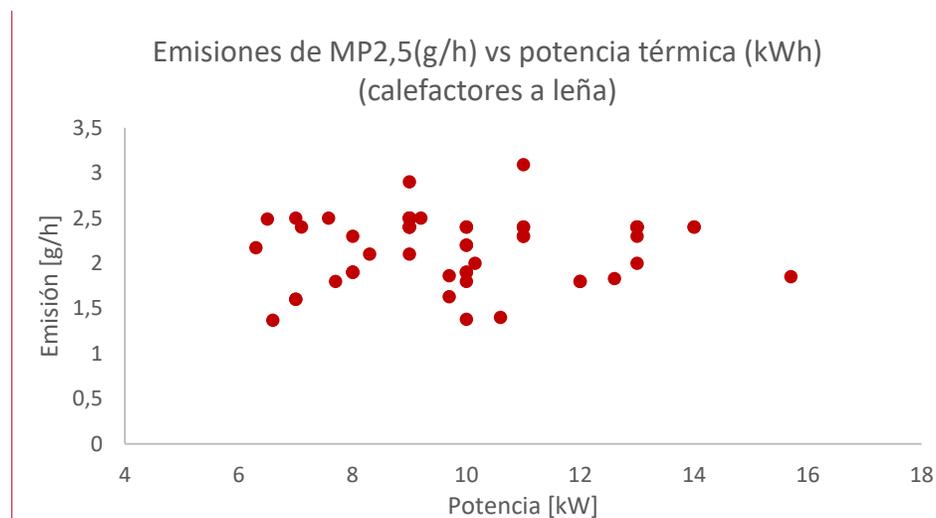


Figura 18, Gráfico de emisiones de los calefactores a leña por modelo vs potencia térmica.

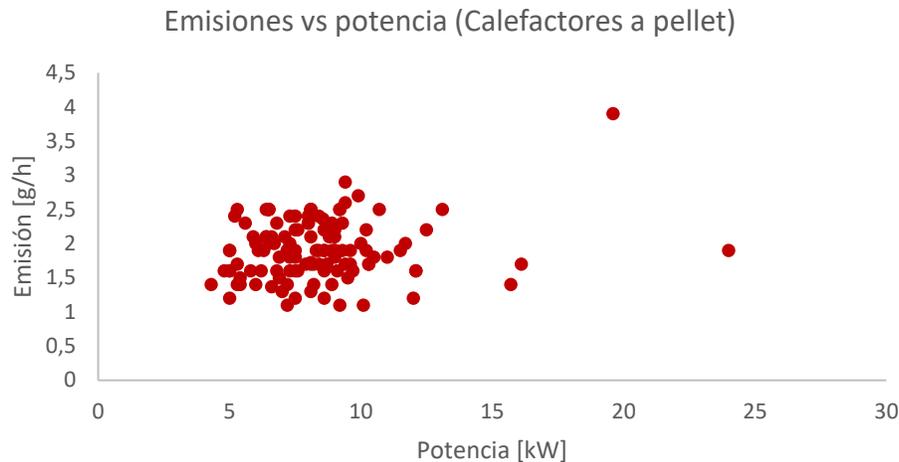


Figura 19, Gráfico de emisiones de los calefactores a pellet por modelo vs potencia térmica.



Figura 20, Fotos de estufas a leña, a la izquierda el modelo 350 marca Amesti y a la derecha el modelo Limit 380 marca Bosca.

Para continuar el análisis, se realizó el cálculo del promedio ponderado de las emisiones de los calefactores, de tal forma de poder contar con una primera aproximación a las emisiones de estos. En la Tabla 31 se muestra el resultado de este análisis, donde se muestra que las emisiones promedio de los calefactores a leña en el rango de potencias de entre 8kW y 14kW, son de 2,2 g/h, levemente superiores a lo calculado para los otros rangos de potencia, mientras que para los calefactores a pellet las emisiones promedio son prácticamente igual para todos los rangos de potencia. Respecto a los límites de emisiones establecidos por sus normativas, se observó que los calefactores por sobre los 8kW cuentan con mayor diferencia entre lo emitido y su límite.

Tabla 31, Análisis de las emisiones ponderadas de los calefactores certificados.

Rango de potencias	ESTUFA A LEÑA			ESTUFA A PELLETS DE MADERA		
	Potencia promedio (kW)	Emisiones promedio (g/h)	Diferencia norma-emisión (g/h)	Potencia promedio (kW)	Emisiones promedio (g/h)	Diferencia norma-emisión (g/h)
Hasta 8kW	7,4	1,9	0,6	6,6	1,8	0,7
Entre 8kW y 14 kW	10,6	2,2	1,3	9,3	1,9	1,6
Entre 14kW y 25kW	15,7	1,9	2,7	18,9	1,9	2,7

Estos resultados fueron complementados mediante el análisis de histogramas de los equipos respecto a sus emisiones, de tal forma que apreció que para los equipos a leña ubicados en el rango de potencias de hasta 8 (kW), el 90% del total se distribuye en una emisión de 1,6 (g/h) y 1,9 (g/h), mientras que los equipos a pellet muestran una mayor variedad de resultados respecto a sus emisiones, estos resultados se muestran en la Figura 21. Para los artefactos en el rango de potencias de entre 8 (kW) y 14(kW), los resultados muestran que el 40% de los equipos a leña comercializados tienen una emisión de 2,4 (g/h), mientras que, para los calefactores a pellet, cerca del 50% tienen una emisión de 1,9 (g/h). Estos resultados muestran que, pese a que la normativa actual permite una emisión mayor a los equipos de potencias altas, estos cumplen con la normativa holgadamente, específicamente, el 98% de los equipos a leña y el 99% de los equipos a pellet con límite de emisión normado de 3,5 (g/h), tienen una emisión reportada en condiciones de laboratorio igual o inferior a 2,5 (g/h), limite que deben cumplir artefactos de menor potencia térmica.

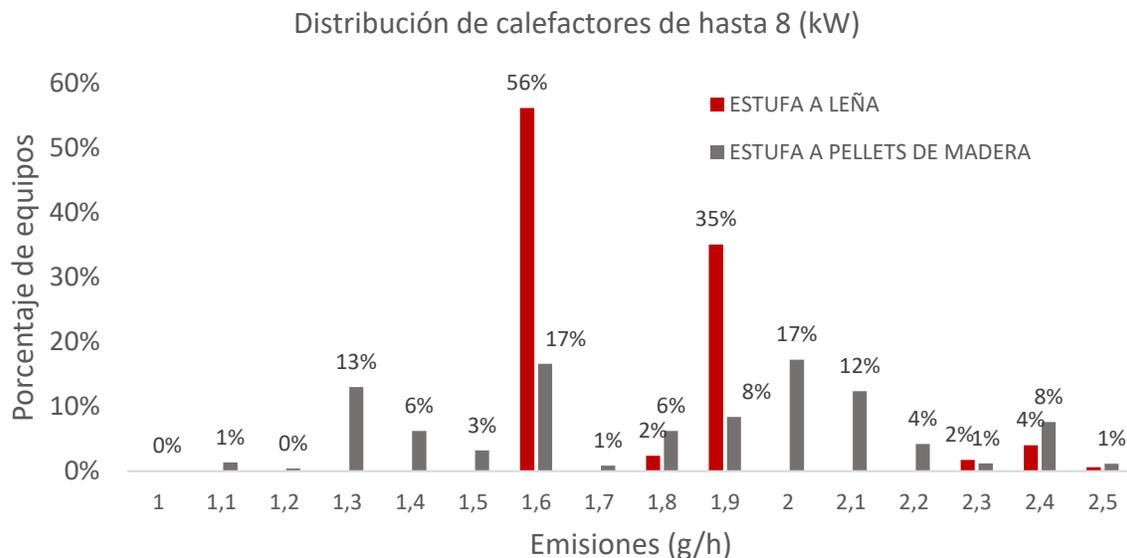


Figura 21, Distribución de calefactores por emisión de material particulado, para el rango de potencias de hasta 8kW.

Distribución de calefactores de entre 8 (kW) y 14 (kW) de potencia

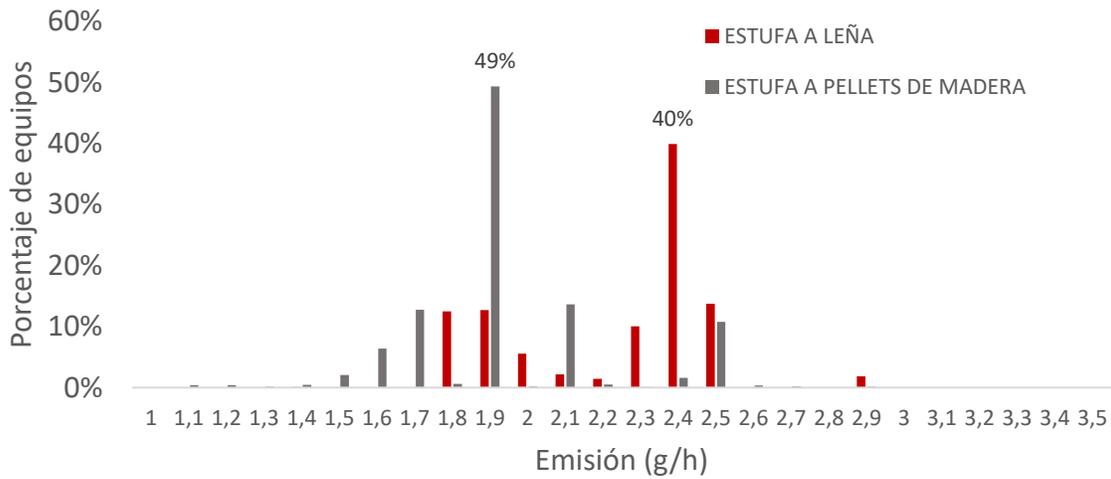


Figura 22, Distribución de calefactores por emisión de material particulado, para el rango de potencias de entre 8kW y 14kW.

Al comparar los distintos modelos certificados con sus precios de venta, se observó que existe una relación lineal entre este y la potencia de cada calefactor, en la Figura 23 se muestra un gráfico que indica esta tendencia. Sin embargo, al analizar el precio en función de las emisiones, no se observa una tendencia o relación funcional, lo cual se encuentra en la Figura 24, donde existen equipos con todo nivel de emisiones para precios similares, este resultado indica a priori, que, en los equipos del mercado actual, no hay un aumento en el precio por equipos menos contaminantes, solo para equipos de mayor potencia.

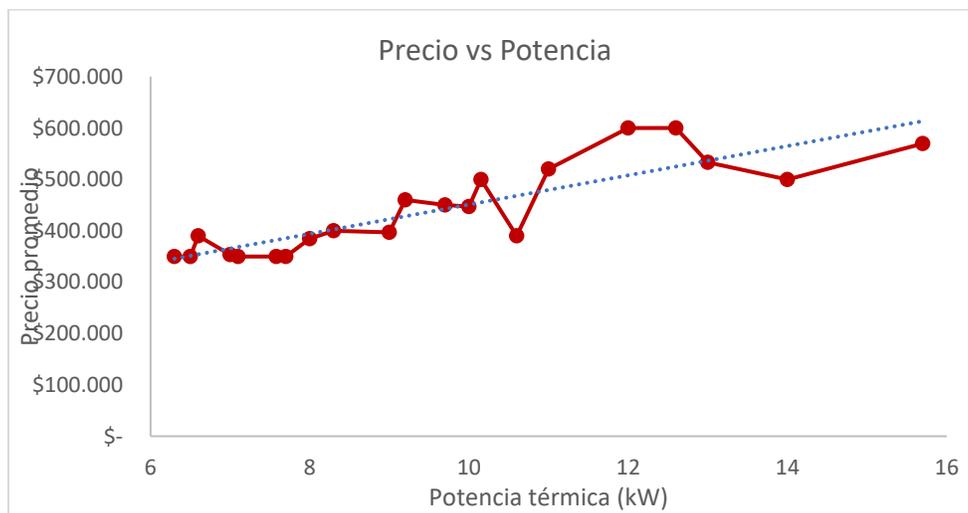


Figura 23, Relación entre el precio de los calefactores a leña y su potencia térmica.

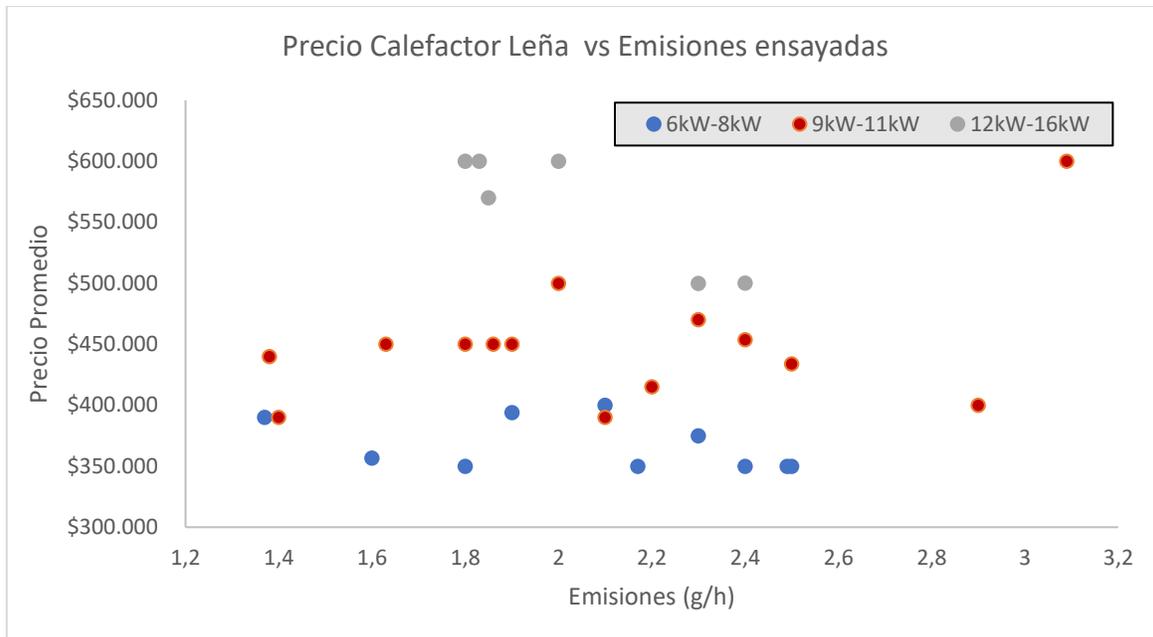


Figura 24, Relación entre el precio de los calefactores a leña y sus emisiones (para equipos dentro de un rango de potencias similares)

De entre los equipos certificado se encuentran modelos de termoestufas a pellet, los cuales son equipos de alta potencia y funcionan tanto para calefacción local como para calefacción en más ambientes por conductos de agua caliente, por tanto, es de interés tener en cuenta que existen en el mercado calefactores de potencias mayores a 25 kW que no requieren certificación, como el modelo de termoestufa Hidro 26 de Bosca el cual es de una potencia de 25,8 kW.



Figura 25, Fotos de termoestufas a pellet, a la izquierda el modelo Hidro de 20 kW marca Khöne y a la derecha el modelo termoestufa Hidro 26 de 25,8 kW marca Bosca.

A continuación se indica puntos desarrollados en ANEXOS:

- El detalle de las chimeneas y cocinas a leña que se comercializan en el mercado nacional se encuentra en ANEXO 14.4.
- El detalle de las mantenciones que se deben realizar a los calefactores a leña y pellet se encuentra en el ANEXO 14.5.
- Los resultados del análisis de las importaciones de calefactores se encuentra en ANEXO 14.6.
- Los principales resultados de las entrevistas a los actores clave del mercado de calefactores, se encuentran en ANEXO 14.7.
- El desarrollo de los desafíos que debe enfrentar el mercado de calefactores se encuentra en ANEXO 14.8.

8. Etapa 3: Identificar las mejoras de diseño y las nuevas tecnologías de abatimiento.

Para esta sección se realizó una búsqueda de las distintas tecnologías de abatimiento de emisiones que se han implementado o se comercializan, así como estudios que han evaluado la implementación de estas.

Para abordar el desafío de las emisiones de $MP_{2.5}$, mayoritariamente provenientes de la combustión de leña empleada en la calefacción y cocina de hogares en ciertas ciudades chilenas, se plantean estrategias con el propósito de reducir dichas emisiones de partículas. Se propone dividir estas estrategias en primarias, orientadas a mejorar la combustión, y secundarias, donde se busca un control al final en el ducto de salida.

8.1. Estrategias primarias:

8.1.1. Mejoras de diseño para calefacción y cocinas

Mejoras de diseño de estufas de leña por Ecodesign

El Ecodesign se enfoca en orientar las pautas y el diseño de equipos que emplean combustibles como la leña y el pellet, con el objetivo de impactar positivamente en la fabricación de estos dispositivos, buscando mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones. Las modificaciones propuestas se centran exclusivamente en la cámara de combustión de las estufas a leña. Dado que esta cámara es el lugar donde se produce la quema de gases, se generan emisiones que no logran completar su combustión. Para que los materiales se oxiden, es necesario que entren en contacto con oxígeno. En las estufas convencionales, este oxígeno se obtiene del ambiente, que generalmente no está a una temperatura adecuada para una combustión eficiente. Con el fin de lograr la obtención de

aire a una temperatura óptima y forzar una oxidación efectiva, es esencial implementar un sistema de doble combustión.

Con el propósito de inducir una segunda combustión, se incorpora una segunda cámara que envuelve la primera, elevando la temperatura del oxígeno y redirigiéndolo. Este enfoque posibilita que, al entrar en contacto con los gases de la combustión, se lleve a cabo el proceso completo de oxidación, resultando en la eliminación de una mayor cantidad de gases y partículas perjudiciales.

Si la segunda combustión no es suficiente, se puede crear una tercera combustión a través de orificios en la cámara principal de la estufa, lo que adiciona una mayor cantidad de oxígeno y consiguiendo una triple combustión⁵⁸.

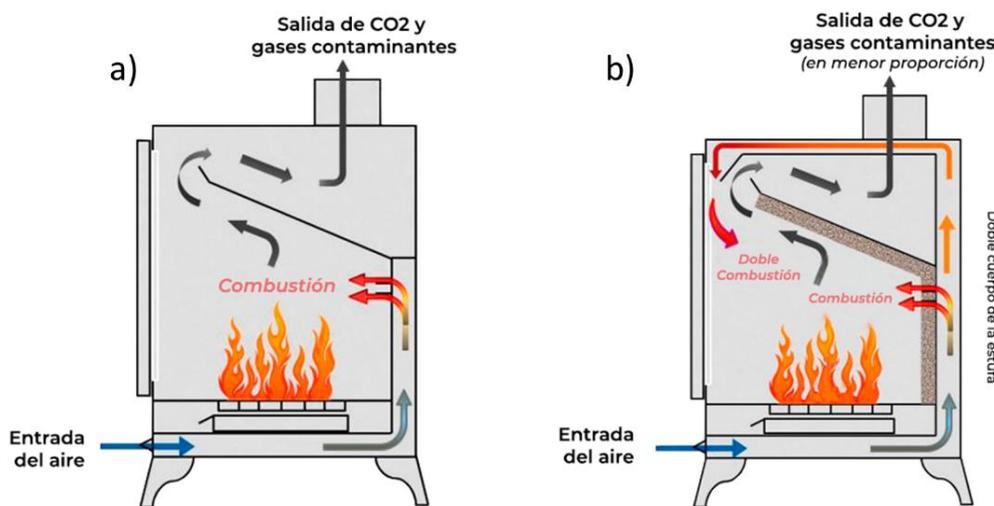


Figura 26, Diferencia en estufas con una doble combustión, donde en a) se observa un equipo donde solo hay una interacción con aire en la combustión b) se observa la entrada de aire precalentado a la cámara de quema, para completar la combustión de partículas.

Diseño de estufas a leña de Bajas emisiones

Para evitar la emisión de MP e inhibir ciertos gases contaminantes se pueden integrar medidas de forma permanente, como lo es la geometría de la cámara o patrones específicos como consideraciones en el combustible y el suministro de aire.

Geometría de las estufas a leña

Una característica de las estufas modernas, tal como se mencionó anteriormente es la división de cámaras primarias y secundarias, donde se busca conservar la temperatura para una oxidación óptima. Unas de las partes donde se pierde calor de la combustión es en las ventanas, por lo que es necesario reducir su tamaño y utilizar un material que disminuya

⁵⁸ <https://www.climmatic.com/climmablog/normativa-ecodesign-2022/>

está perdida, como por ejemplo lo es el vidrio revestido ya que minimiza la pérdida de calor por radiación⁵⁹.

Otro punto del diseño a estudiar es el tamaño de la cámara de combustión, ya que depende directamente de la potencia calorífica que se desea en la estufa. Una cámara de mayor tamaño provocará una mayor pérdida de calor específico, generando gases fríos y una combustión incompleta, tal como se muestra en la Figura 27, sin embargo, un diseño de estufa con una geometría alta y delgada mejora la dispersión de la llama lo que ocasiona un patrón homogéneo de gases. Además, se deben evitar cámaras amplias, profundas y bajas⁶⁰.

También los patrones de superficie ranurados y deflectores en la cámara postcombustión aumentan la turbulencia local, disminuyendo las emisiones y resultando una oxidación adecuada. Tres deflectores, tal como se muestra en la Figura 28, producen un equilibrio para el mejoramiento de la estufa⁶¹.

Todos los diseños mencionados en anteriormente deben ser evaluados por mediciones en terreno, no en laboratorio. Esto se debe a que las estufas no son siempre utilizadas de acuerdo con lo recomendado por el fabricante y algunos diseños optimizados para bajar las emisiones pueden no funcionar en el largo plazo y en terreno. Por ejemplo, en la Figura 26 se muestran dos diseños que en laboratorio mejoran las emisiones de las estufas. La Figura 28 muestra otro diseño que puede mejorar más aún las emisiones, sin embargo, este diseño, muestra una cámara que puede ser muy angosta para el paso del aire y que puede taparse muy rápidamente con ceniza. Por ello, es necesario realizar pruebas en terreno y de largo plazo (al menos 3 meses) y evaluar de forma continua las emisiones, antes de adoptar o recomendar un diseño para fabricación.

⁵⁹ R. Mack, D. Kuptz, C. Schön and H. Hartmann, "Optimierungspotenziale bei Kaminöfen. Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste. Berichte aus dem TFZ 57". TFZ, 2018.

⁶⁰ R. L. Hvidberg, J. S. Andersen, K. Vang, P. K. Sørensen, B. Eskerod, O. Hansen and S. N. Bertel, "LowCarbon Brændkammer - MUDP 1946,". Miljøstyrelsen, 2017.

⁶¹ R. L. Hvidberg, J. S. Andersen, K. Vang, P. K. Sørensen, B. Eskerod, O. Hansen and S. N. Bertel, "LowCarbon Brændkammer - MUDP 1946,". Miljøstyrelsen, 2017.

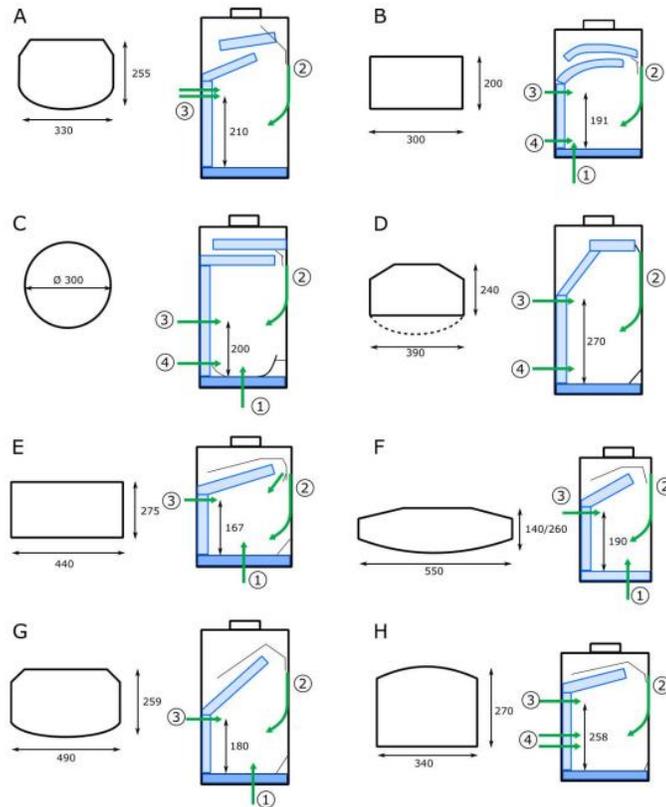


Figura 27, Estufas que cumplen con el requisito de doble cámara de Ecodesing. Los números de 1 al 4 son corrientes de aire, donde 1 es aire primario, 2 es aire de la ventana, 3 aire secundario y 4 aire piloto, el cual actúa como aire primario, pero solo se utiliza durante el encendido. Adaptación de IEA Bioenergy del estudio danés de 2017, "LowCarbon Brændkammer - MUDP 1946".

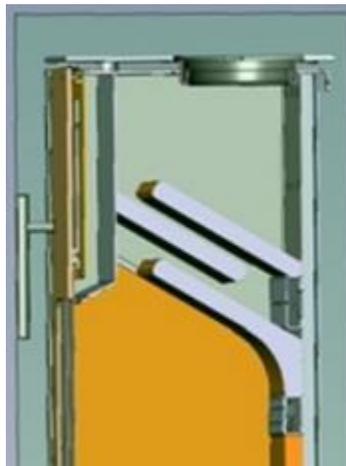


Figura 28, Ejemplo de los tres deflectores en la zona postcombustión, rescatada de "LowCarbon Brændkammer".

Diseño de chimenea y conducto de humos

Un tiro insuficiente provoca falta de oxígeno, lo que a su vez produce una combustión incompleta y un aumento de emisiones⁶².

Se requiere una diferencia de presión mínima en la estufa, si bien la presión óptima varía según el modelo específico. Es crucial informar al usuario acerca del tiro mínimo necesario para la estufa con el objetivo de lograr emisiones reducidas y pérdida térmica mínima. Para impulsar mejoras en este aspecto, el instalador de la estufa debe evaluar y ajustar el tiro antes de la instalación, tomando medidas correctivas si es necesario.

La resistencia al flujo en chimeneas y conductos de gases debe mantenerse al mínimo. Esto se puede lograr limitando el número de curvas y evitando ángulos agudos en el conducto de gases de combustión. El tiro está directamente vinculado a la diferencia de temperaturas entre los gases de combustión y el entorno. Las estufas actuales están aisladas para garantizar una temperatura y tiro adecuados, previniendo la condensación de los gases de combustión. Además, es posible ajustar el aislamiento o el revestimiento interior para optimizar estos aspectos.

La instalación de un ventilador en la chimenea o en el conducto de humos también puede tener un impacto significativo en el tiro, mejorándolo de manera efectiva.

Sistemas de control automático

El mal uso por parte del usuario puede provocar un aumento significativo de las emisiones, esto podría evitarse al implementar un sistema de control automático en la estufa. Estos pueden determinar el momento óptimo de repostar combustible y notificar al usuario, reduciendo emisiones de forma significativa durante la combustión⁶³. Además, se pueden incorporar o adaptar a las estufas existentes y es fundamental la buena ejecución para evitar el efecto contrario.

En la Figura 29 se muestran patrones típicos de temperatura de los gases O₂ y CO para una estufa convencional y una con control automático, donde la temperatura es más estable y controlada y con un nivel de O₂ más uniforme y menor durante la segunda fase, y el nivel de CO₂ también es menor. La idea de esta optimización es cerrar automáticamente las trampillas de aire después del funcionamiento de la calefacción⁶⁴.

⁶² R. Mack, H. Hartmann, C. Mandl, I. Obernberger, I. Schüßler, F. Volz, J. Furborg and J. Illerup, "Wood Stoves 2020 – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves," 2017.

⁶³ R. Mack, D. Kuptz, C. Schön and H. Hartmann, "Optimierungspotenziale bei Kaminöfen. Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste. Berichte aus dem TFZ 57"). TFZ, 2018.

⁶⁴ C. Mandl, I. Obernberger, R. Mack, H. Hartmann, I. Schüßler, J. Furborg, J. Illerup and F. Volz, "Guidelines for automated control systems for stoves," ERA-NET Bioenergy, 2017.

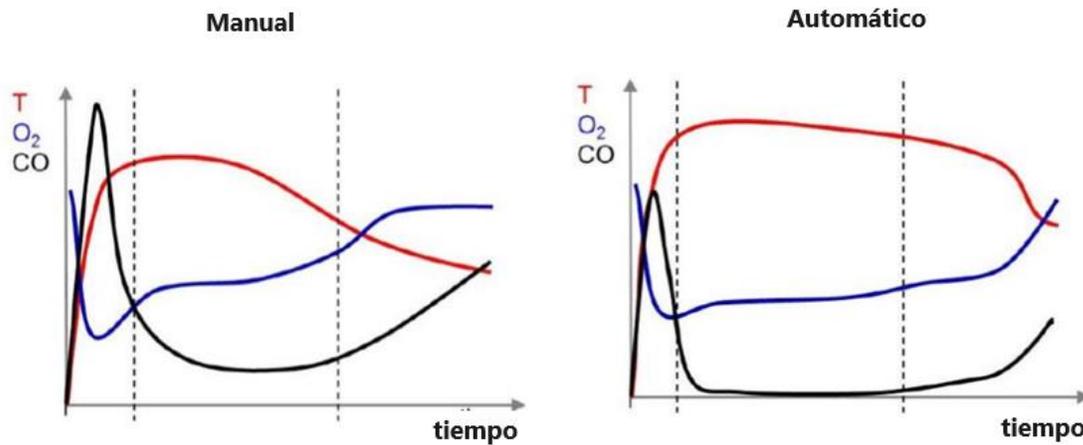


Figura 29, Series temporales de la temperatura de los gases de combustión CO y O₂ de forma cualitativa sin y con control automático.

Para controlar la combustión, la ayuda de sensores es nueva en el área y son necesarios como parámetros de entrada la medición de temperatura y concentración de oxígeno en los gases de escape. Las señales son usadas para posicionar las trampillas/ respiraderos de aire con ayuda de motores eléctricos. Los estabilizadores de tiro son elementos adicionales a las estufas con control automático.

Las fases de combustión pueden identificarse por los cambios de temperatura que pueden utilizarse para regular el aire de combustión⁶⁵. Esto puede controlarse mediante actuadores bimetalicos o dispositivos electrónicos, como sensor y motor.

- Fase de encendido: Necesidad de aire primario para encender y aumentar la temperatura de la Cámara de combustión de forma rápida
- Fase de combustión principal: El aire primario se reduce para evitar una excesiva velocidad en combustión y un aumento de misiones. A su vez, se aumenta el aire secundario y el aire de las ventanas para mantener niveles constantes de oxígeno.
- Quemado de carbón: El aire secundario y de ventanas se reducen para mantener la temperatura alta y los niveles de O₂ constantes. La recarga debe hacerse justo al extinguirse las llamas para evitar mayores emisiones.

El control de la estufa se puede obtener monitoreando la temperatura o de los componentes de los gases de combustión, en específico el oxígeno.

En estufas modernas, en la práctica solo es factible adaptar los controladores de las trampillas de aire en la entrada de aire central, lo que conlleva que el aire puro primario,

⁶⁵ C. Mandl, I. Obernberger, R. Mack, H. Hartmann, I. Schüßler, J. Furborg, J. Illerup and F. Volz, "Guidelines for automated control systems for stoves," ERA-NET Bioenergy, 2017.

secundario y de ventana no se pueden controlar de forma independiente, permitiendo un control de aire primario y una reducción de emisiones⁶⁶.

- Consideraciones de seguridad:
 - En caso de corte de energía o falla del sensor, la estufa debe volver a un estado seguro que permita el control manual.
 - Los gases de pirólisis no deben liberarse desde el interior de la estufa ya que podrían provocar intoxicación.
 - Detección de la apertura de la puerta.
- Tecnología de sensores:
 - Termopares: Son económicos y se utilizan en estufas automáticas
 - Sensores de gas: Los sistemas de control más elaborados los incluyen de forma adicional. Los más utilizados detectan oxígeno, CO₂ y CO. Los sensores de oxígeno son más precisos y tienen baja sensibilidad cruzada, son duraderos y fiables. Los sensores de CO pueden responder a hidrocarburos y son más caros que los de oxígeno.
 - Sensores de presión en combinación con estabilizadores de tiro/ventiladores de humo.
 - Detectores de llama.
 - Sensores que detectan la apertura de la puerta.

Las principales características para considerar del sensor son la solidez, precisión y el costo. El costo añadido del sistema de control y sensor debe estar en relación adecuada con el precio de la estufa y la ganancia en eficiencia. Lo ideal es que los sensores duren la vida útil de la estufa, en caso contrario debe ser especificado para el usuario. Además de los repuestos es importante conocer si es necesaria una calibración del sensor.

Los sensores deben ser capaces de aguantar altas temperaturas, en especial para sensores de presión y gas. El costo se eleva si le agregan características como mediciones de gas caliente.

Como se mencionó en el punto “Diseño de estufas a leña de Bajas emisiones”, los diseños de control automático, sensores, etc., deben ser evaluados por mediciones en terreno, no en laboratorio. Esto se debe a que las estufas no son siempre utilizadas de acuerdo a lo recomendado por el fabricante y algunos diseños optimizados para bajar las emisiones pueden no funcionar en el largo plazo y en terreno. Por ello, se recomienda realizar pruebas en terreno y de largo plazo (al menos 3 meses) y evaluar de forma continua las emisiones, antes de adoptar o recomendar un diseño para fabricación.

⁶⁶ R. Mack, H. Hartmann, C. Mandl, I. Obernberger, I. Schüßler, F. Volz, J. Furborg and J. Illerup, "Wood Stoves 2020 – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves," 2017

8.2. Tecnologías de abatimiento

Entre los diversos métodos que se han probado para abatir emisiones se encuentran los filtro o precipitadores electrostáticos (ESP) y los filtros catalíticos.

8.2.1. Filtros electrostáticos (PES)

Los filtros electrostáticos, también conocidos como precipitadores o descontaminadores electrostáticos (PES), se emplean para capturar partículas mediante su ionización, atrayéndolas con carga electrostática inducida. Son especialmente útiles para reducir la contaminación atmosférica originada por humos y otros desechos industriales gaseosos, particularmente en fábricas que emplean combustibles fósiles⁶⁷.

Un PES utiliza fuerza eléctrica. A las partículas se les aplica una carga eléctrica, la cual las fuerza a una región en la cual fluyen iones gaseosos y provienen de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo. Ya estando las partículas recolectadas sobre las placas, son removidas sin que se dirijan en la corriente del gas, gracias a un desprendimiento y su deslizamiento hacia una tolva desde la que son evacuadas, generalmente se remueven con lavados de agua intermitentes o continuos⁶⁸.

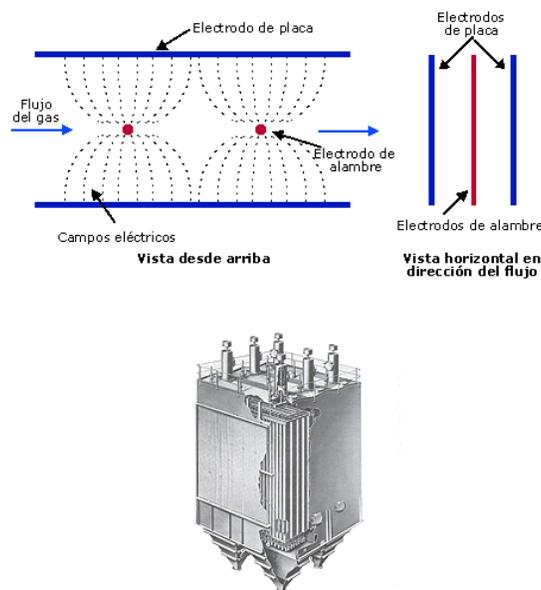


Figura 30, vista desde arriba, sistema simplificado del funcionamiento del Precipitador electrostático y abajo un diseño de Precipitador electrostático⁶⁹

⁶⁷ <https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/como-funciona-un-filtro-electrostatico/>

⁶⁸ <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/cica/files/cs6ch3-s.pdf>

⁶⁹ https://cidta.usal.es/riesgos/CD1/control_contaminacion_aire/www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc8/lecc8_3b.html



8.2.2. Tipos de PESs

Los tipos de filtro electrostáticos dependen de sus distintas configuraciones:

- **Precipitadores de Placa-Alambre**

En este dispositivo el gas fluye entre placas paralelas de metal y electrodos a alto voltajes, los cuales son alambres largos con pesas, colgando entre las placas o soportados por armazones rígidos. El flujo fluye por cada alambre en secuencia a través de la unidad y permite que distintas líneas de flujo operen de forma paralela. Además, puede manejar grandes cantidades de gases.

Para la limpieza del instrumento, está dividida la placa en secciones de 3 a 4 en serie, las que pueden ser golpeadas de manera independiente. El polvo también se precipita en el alambre de electrodo de descarga y se debe remover de forma periódica al igual que la placa de recolección.

El voltaje que se le aplica a los electrodos produce que el aire entre ellos se rompa eléctricamente, a esto se le denomina “corona”. Frecuentemente a los electrodos se le asigna una polaridad negativa ya que así soporta un voltaje mayor. Los iones recorren las líneas de campo desde los alambres hasta las placas recolectoras y van interceptando algunos iones, en los cuales se adhieren. Por ende, las fuerzas eléctricas son más fuertes que las partículas más grandes. A medida que las partículas recorren los alambres, se acercan cada vez más las paredes de recolección, pero las turbulencias en el gas las conservan mezcladas de manera uniforme, de modo que existe un tipo de competencia entre las fuerzas eléctricas y las dispersivas. El golpeteo para desprender la acumulación de partículas también dirige típicamente un 12% para cenizas volátiles de carbón nuevamente a la corriente del gas, por lo que se repite el proceso en las secciones posteriores hasta la última sección de la PES donde ya no hay opción de recapturarlas y escapan de la unidad.

Un factor importante de tener en cuenta en el precipitador es la resistividad del material recolectado ya que las partículas forman sobre una capa la placa de la PES y debe ser traspasada por la corriente de iones para alcanzar las placas a tierra. Esta corriente crea un campo eléctrico en la capa y puede ser lo bastante grande para ocasionar un rompimiento eléctrico local. Donde nuevos iones de polaridad contraria son administrados dentro del claro placa-alambre reduciendo las partículas e incluso llegando a provocar chispas. Esta condición de rompimiento es conocida como “corona invertida” y puede causar severas dificultades para cargar partículas por lo que se debe tener cuidado al medir o estimar la resistividad ya que dependen de variables como la temperatura, humedad, composición del gas y de partículas.



- **Precipitadores de Placa Plana**

Precipitadores de 100.000 a 200.000 *acfm*, utiliza placas en sustitución del alambre para los electrodos de alto voltaje. Al tener placas planas se aumenta el campo eléctrico promedio utilizado para la recolección de partículas con un área superficial mayor.

Para este filtro, las coronas no pueden generarse por sí mismas por lo que es necesario electrodos por delante y/o detrás de la zona de recolección de partículas para su generación, las cuales pueden ser agujas adheridas a los bordes de las placas o alambres de corona independientes. La polaridad que utiliza puede ser tanto negativa como positiva, pero al usar la positiva se reduce la generación de ozono.

Este tipo de precipitadores operan con poca o ninguna corriente de corona fluyendo a través del polvo recolectado a excepción de las gujas o alambres. Esto entrega dos consecuencias: al no generarse la corona, las partículas cargadas con ambas polaridades de iones tienen una superficie mayor de recolección y la falta de corriente en la capa recolectada causa una fuerza eléctrica que remueve la capa de la superficie de recolección, produciendo pérdidas por golpeteo.

Aplicaciones para partículas de diámetros masivos medio pequeños de 1 a 2 μm destacan especialmente las fortalezas del diseño porque las fuerzas eléctricas desprendedoras son más débiles para partículas pequeñas.

- **Precipitadores tubulares**

Los tubulares fueron los primeros filtros, se colocaban en el tubo de chimenea con los electrodos a alto voltaje colocados a lo largo del eje del tubo. Los tubos pueden tener forma de panal circular, cuadrado o hexagonal con el gas fluyendo hacia arriba o hacia abajo, y su longitud depende de las condiciones. Este tipo de PES puede ser sellado de forma hermética para prevenir fugas. También es solo una unidad con una sola etapa donde pasa todo el gas a través de la región de electrodo, el cual funciona a alto voltaje en la longitud del tubo y su corriente varía según la remoción de partículas. Este tipo de PES se aplica comúnmente en particulado húmedo o pegajoso y tienen una pérdida de encaminamiento menor que los precipitadores de particulado seco.

- **Precipitadores húmedos**

Todas las opciones de filtros ya mencionadas pueden actuar con paredes húmedas. El flujo de agua aplicada a este filtro puede ser continuo o intermitente para el lavado de partículas recolectadas hacia un cárcamo. Su ventaja es la dirección por golpeteo o con coronas invertidas. Su desventaja es al lavar el filtro, ya que el lodo recolectado debe ser manejado con más precaución que en un producto seco.

- **Precipitadores de Dos etapas**



Es un dispositivo en serie con el electrodo de descarga o ionizador, saliendo a los electrodos de recolección. Su ventaja es el mayor tiempo de carga de partículas, menos tendencia a corona invertida. Su funcionalidad es para volúmenes de gas de hasta máximo de 50.000 *acfm* y se aplica a fuentes submicrométricas ya que la fuerza eléctrica para retener las partículas en las placas es poca. Para la limpieza del filtro puede ser mediante un lavado con agua de los módulos removible o automático en el mismo filtro por aspersión del colector con detergente y luego secado por sopleteo de aire.

8.2.3. Ejemplo de Filtro electrostático en Chile: MPzero

El equipo “Potencial Chile”, constituido por un grupo de jóvenes profesionales y creada con el objetivo de desarrollar tecnología e innovación, se planteó el desafío de la creación de un PES para reducir emisiones producidas por estufa a leña en Chile de hasta un 90% de MP. El grupo logró levantar financiamiento para desarrollar y validar la tecnología a través del Impacta Energía por USD 100.000, capital semilla CORFO por USD 35.000 y Protección de propiedad intelectual de CORFO por USD 8.800, junto a apoyo en otras actividades con plataformas de innovación y emprendimiento⁷⁰.

MPzero fue el producto creado por Potencial Chile, el cual consiste en un precipitador electrostático de escala residencial, cuyo fin es capturar el material particulado que pasa a través del tubo de la estufa y retenga una liberación de un 97% de MP producidas por la combustión. Se realizó una prueba de pilotaje, cuyos resultados de laboratorio demostraron una captura del 97% en disminución de emisiones y una eficiencia de reducción en condiciones óptimas del 66%, junto a un ahorro del 22% de uso de leña.⁷¹

Actualmente el filtro para estufa a leña tiene un valor de \$380.000⁷² y reduce entre un 70% y 90% en emisiones de MP y un 22% el consumo de leña, según sus especificaciones técnicas. Su potencia media es de 80 W a 100W, y en un uso variable entre 8 y 12 horas diarias se estima un gasto de aproximadamente \$3.000 al mes. Además, es de fácil instalación, poco invasivo en el entorno de la vivienda, y requiere una limpieza periódica⁷³. Sin embargo, se realizó un pilotaje en Coyhaique⁷⁴ con filtros electrostáticos para conocer

⁷⁰ <https://www.madera21.cl/blog/project-view/mpzero/>

⁷¹ <https://socialinnovationsjournal.org/editions/issue-54/75-disruptive-innovations/2930-mpzero-calefaccion-sustentable-economica-y-limpia-al-alcance-de-todos#:~:text=Esta%20tecnolog%C3%ADa%20es%20ampliamente%20usada,de%20captura%20cercana%20a%2099%25>

⁷² <https://sabes.cl/2022/10/05/mpzero-penquistas-crean-nuevo-dispositivo-de-calefaccion-economico-limpio-y-sostenible/>

⁷³ <https://www.mpzero.cl/el-filtro/>

⁷⁴ Proyecto Investigación Análisis Ambiental de Abatimiento de Material Particulado, CIEP-Centro de investigación en ecosistemas de la Patagonia.

la mitigación a través de su implementación, donde se utilizaron 45 filtros (40 OekoTube y 5 MPZero). Se evaluaron las partículas emitidas en cocinas a leña con el precipitador apagado, y luego con el aparato funcionando, para conocer el porcentaje de eficiencia asociada a los filtros. Los resultados revelaron que existe un intervalo de eficiencia entre un 40% y un 70% de la captura de partículas, y esta eficiencia disminuye cuando la cocina funciona con leña húmeda.

Al ser un producto de innovación aún no existen métodos de certificación en el país, por lo que no se puede entregar un certificado regulatorio como la de la SEC. Aun así, cuenta con pruebas de laboratorio certificado para ver eficiencia y niveles de emisiones.

Tabla 32, Diagrama que indica la reducción de emisiones por parte de la tecnología de filtros electrostáticos de MPZero.

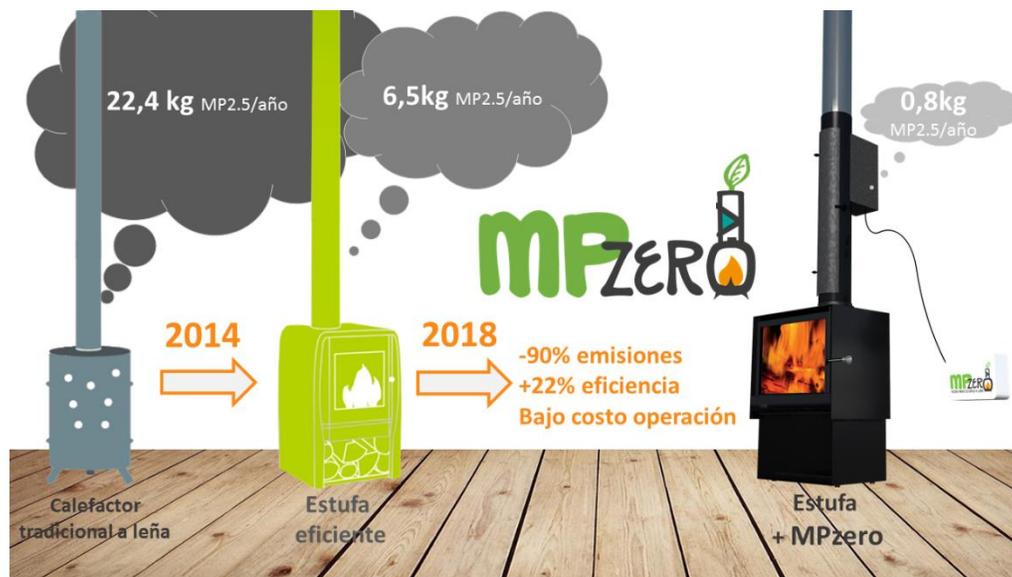


Figura 31, Infografía de los efectos en la reducción de emisiones y eficiencia del uso de filtros electrostáticos. Fuente MPZero⁷⁵.

8.2.1. Ejemplo filtro electrostático en Suiza: OekoTUBE

OekoTube⁷⁶ es un filtro electrostático que reduce sustancialmente las partículas de material particulado. Esta idea se desarrolló en 2007 por un profesor de ingeniería eléctrica de NTB. En 2008 salió al mercado por primera vez y se optimizó en 2010

El modelo OekoTube-Outside es un filtro para estufas a leña, chimeneas abiertas, estufas independientes, estufas de pellet y estufas de carbón. Las especificaciones técnicas del

⁷⁵<https://socialinnovationsjournal.org/editions/issue-54/75-disruptive-innovations/2930-mpzero-calefaccion-sustentable-economica-y-limpia-al-alcance-de-todos#:~:text=Esta%20tecnolog%C3%ADa%20es%20ampliamente%20usada,de%20captura%20cercana%20a%2099%25>

⁷⁶ <https://oekosolve.com/en/company/oekosolve-company/>

producto su consumo de energía es de máximo unos 30 W, para su formato pequeño, y en espera de 1 W. La temperatura de los gases de escape es de hasta 400 °C y su eficiencia de filtrado es de un 95%, Aunque en el pilotaje de Coyhaique antes mencionado se encontró que la eficiencia estaba solo dentro del rango de un 40% a un 70% de eficiencia.

El modelo más reciente es el Oeko Tube- Inside⁷⁷, homologado para estufas de leña y carbón, y se monta en la sala de calderas. Sus especificaciones técnicas establecen también, una eficiencia del 95 %.

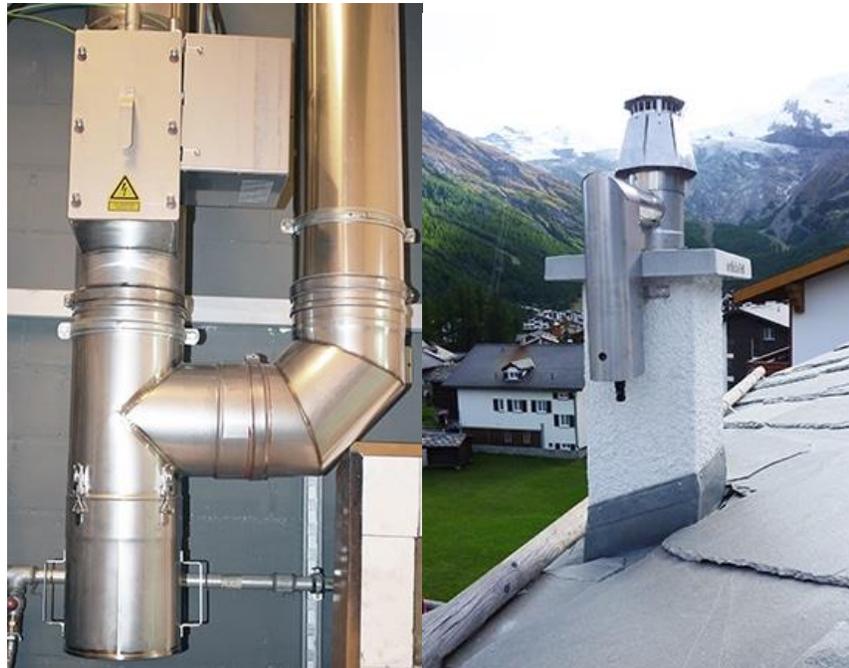


Figura 32. Filtro Electrostatico OekoTube- Inside a la izquierda y OekoTube-Outside a la derecha. Fuente: OekoSolve AG.

Al igual que lo mencionado en puntos anteriores, los sistemas de control de emisiones ya sean electrostáticos, de agua, etc., deben ser evaluados en terreno, no en laboratorio por un tiempo suficientemente largo como para ver su efectividad real de reducción de emisiones. Los filtros electrostáticos cargan las partículas emitidas por la estufa y las precipitan sobre las paredes del filtro. Por ello, después de un tiempo deben limpiarse. Si esto no ocurre, la acumulación de masa reduce el campo eléctrico del filtro y pierde efectividad para capturar partículas. Por ello, se recomienda realizar pruebas en terreno y de largo plazo (al menos 3 meses) y evaluar de forma continua las emisiones, antes de adoptar o recomendar un diseño para fabricación.

⁷⁷ <https://oekosolve.com/en/products/stack-filters-automatic-wood-combustion/oekotube-inside/>

8.3. Filtros catalíticos

Por otra parte, los filtros catalíticos son dispositivos que permiten disminuir las emisiones contaminantes al medio ambiente, gracias a un elemento catalizador, el cual combustiona las partículas que no fueron quemadas dentro de la cámara de combustión de la estufa.

Estos dispositivos presentan la particularidad de quemar las partículas de hollín provenientes de la combustión de leña empleada para la calefacción del hogar. Estos filtros están diseñados para adaptarse a estufas existentes, elaborados con forma de panel cerámico o metálicos, y es fundamental asegurar el funcionamiento adecuado de estos sistemas.

8.3.1. Ejemplo de Filtro catalítico en Chile: RetroCATT.

RetroCATT de PUREXHAUST⁷⁸, es un ejemplo de filtro con tecnología chilena de componente cerámico que, al alcanzar la temperatura adecuada, inicia un proceso de incineración de las partículas de emisiones contaminantes. Sus especificaciones técnicas prometen una eficiencia de un 60% en eliminación de material particulado, valor verificado por un muestreo que realizó la Universidad de Santiago en 200 equipos instalados en terreno en Temuco, y cuyas marcas a medir fueron; Bosca, Amesti, Efel, Alcazar, Neoflam y Gertem.

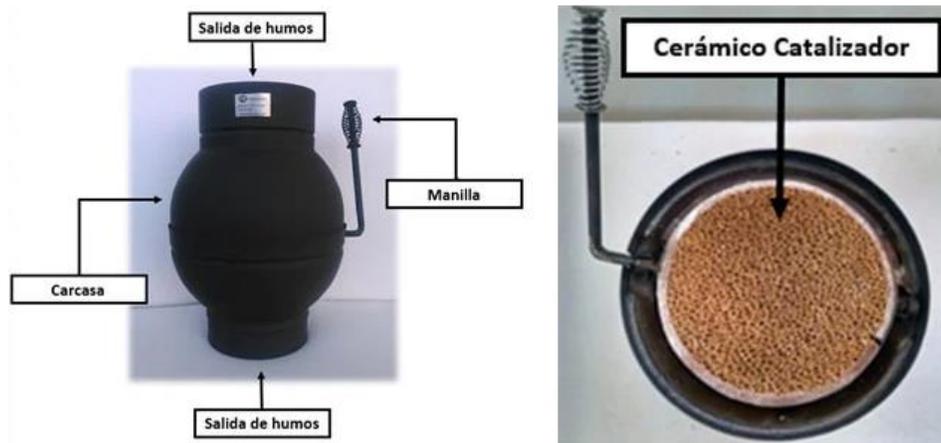


Figura 33, Filtro catalítico RetroCATT, Fuente: Purexhaust⁷⁹.

⁷⁸ <https://purexhaust.com/productos-y-servicios/retrocatt/>

⁷⁹ <https://purexhaust.com/productos-y-servicios/retrocatt/>

8.3.2. Ejemplo de Filtro catalítico en Reino Unido: MidCat Puriflue – Clean Air⁸⁰

Este filtro catalítico desarrollado en el Reino Unido se puede instalar en estufas a leña nuevas o viejas, el objetivo del producto es la reducción de emisiones sin la necesidad de instalar un equipo nuevo y cumpliendo las normas ecológicas. Este filtro promete una reducción superior al 75% de monóxido de carbono, un 35% los OGC y un 25% de material particulado⁸¹. Este artefacto solo debe instalarse en la chimenea y tiene una estructura de panel metálica de flujo libre.



Figura 34, Filtro catalítico MidCat Puriflue- Clean Air. Fuente:Chimneycowl.

Un estudio⁸² sobre los sistemas catalíticos integrados en estufas de leña evaluó el impacto en las emisiones de dos tipos de catalizadores de panel fabricados con distintos materiales. Ambas mediciones fueron realizadas bajo condiciones relacionadas con la vida real. Este tipo de geometría afecta las condiciones de combustión primaria, ya que existe una baja de presión que puede influir en las emisiones. Este efecto disminuye la eficiencia catalítica y debe ser considerada para el desarrollo de soluciones integradas con catalizadores.

Al realizar el estudio se observó una reducción total significativa de las emisiones por parte del catalizador cerámico, el cual redujo las emisiones de CO en un 83%. Mientras que el catalizador metálico minimizó estas emisiones en un 93%. La reducción de emisiones de COV fue de aproximadamente un 30% y las emisiones de MP aproximadamente de un 20%, estas reducciones fueron similar para ambos tipos de catalizadores.

⁸⁰ <https://midcat.midtec.co.uk/>

⁸¹ <https://www.chimneycowlproducts.co.uk/product/midcat-puriflue-cleaner-air/>

⁸² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382018303515>

Para la mayoría de las emisiones se cumplieron los límites establecidos por el "Ecodesign" del 2022 para nuevas estufas y la composición de las emisiones de MP mostró una menor proporción de carbono elemental y carbono orgánico con el catalizador integrado.

Al igual que el comentario para los filtros electrostáticos, éstos deben ser evaluados en terreno, no en laboratorio por un tiempo suficientemente largo como para ver su efectividad real de reducción de emisiones. Por ello, se recomienda realizar pruebas en terreno y de largo plazo (al menos 3 meses) y evaluar de forma continua las emisiones, antes de adoptar o recomendar un diseño para fabricación.

8.4. Comparación entre filtros

A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre ambos filtros, enseñando algunas de sus características encontradas en el mercado mayoritariamente local:

Tabla 33, Comparativa de los tipos de filtros utilizados para eliminar MP de la combustión.

	Filtro electrostático ⁸³	Filtro catalítico ⁸⁴
Reducción de emisiones	90% - 95% de partículas ultrafinas 70% - 75% de la masa total	60% - 75%
Eficiencia	Eficacia alta y constante. Tienen una capacidad de retención de partículas muy alta, lo que los hace muy eficaces en la eliminación de partículas pequeñas y submicrónicas.	Posee una eficiencia de captura máxima de tan solo 60% y restricciones de uso bajo condiciones de combustión no óptimas, como baja temperatura o uso de leña verde o húmeda.
Instalación	Fácil instalación, pero se recomienda la instalación de una persona autorizada. Son fáciles de instalar y requieren poco espacio en comparación con otros tipos de filtros.	Es de muy fácil instalación, pero aun así es necesario que sea realizado por un técnico.
Mantenimiento	Necesita una correcta y periódica limpieza del sistema, si ésta no se realiza cada 15 días la eficiencia del sistema disminuye.	El catalizador no requiere limpiezas de forma frecuente.

⁸³ <https://www.geofilter.cl/filtroelectroestatico.html>
<https://www.aircare.com.mx/producto/filtro-electrostatico/>
<https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/como-funciona-un-filtro-electrostatico/>
<https://www.mpzero.cl/>

⁸⁴ <https://purexhaust.com/productos-y-servicios/retrocatt/>
<https://purexhaust.com/wp-content/uploads/2017/07/Retrocatt-Manual-de-Usuario.pdf>
<https://purexhaust.com/wp-content/uploads/2017/07/Retrocatt-Manual-de-Servicio.pdf>

	Filtro electrostático ⁸³	Filtro catalítico ⁸⁴
	Filtros con limpieza automática, deben ser limpiado mínimo una vez al año.	
Durabilidad	Los filtros electrostáticos son resistentes y duraderos, y pueden durar mucho tiempo sin necesidad de reemplazarlos.	El catalizador tiene una vida útil de entre 4 y 7 años.
Otras características	<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad de acumulación. Ahorro energético. Permanente, lavable y fácil de limpiar Baja resistencia al flujo del aire 	<ul style="list-style-type: none"> Remueve humo visible y vapores orgánicos.
Costos*	<ul style="list-style-type: none"> Inversión: \$400.000 - \$2.492.960 aprox. Operación: <ul style="list-style-type: none"> Durante funcionamiento: \$4,20 - \$12,60 En espera: \$0,01 - \$0,28 Mantención: \$30.000 anuales 	<ul style="list-style-type: none"> Inversión: \$133.965 - \$535.860 aprox. Operación: No aplica Mantención: \$30.000 anuales

*NOTA: Los costos fueron estimados en pesos chilenos (CLP), los costos de operación serán variables según la zona del país, se consideró la equivalencia de 1 kW a \$140. Los costos de mantención están en base a la experiencia del equipo consultor.

En términos generales de este apartado, se han introducido al mercado diversas formas innovadoras para reducir las emisiones de los calefactores, ya sea a través del diseño mismo de estos equipos o mediante tecnologías que directamente disminuyen o eliminan las emisiones. Muchas de las mejoras en el diseño tienen su origen en la optimización de la calidad de la combustión, mediante la adecuación de las entradas de aire y la temperatura durante el proceso. Este enfoque plantea un desafío directo a los fabricantes de equipos, quienes deben incorporar estas mejoras para lograr la reducción deseada de emisiones.

Por otro lado, las tecnologías destinadas a la reducción de emisiones son en su mayoría componentes externos a los equipos. Estas tecnologías buscan reducir una parte de las partículas (MP) generadas durante el proceso de combustión y, por lo tanto, son aplicables tanto a equipos nuevos como a los ya existentes. Sin embargo, la principal barrera para la adopción de estas tecnologías es su costo, que en algunos casos puede equipararse al del propio calefactor. Esto hace que, aunque estas tecnologías puedan resultar en una disminución del consumo de leña debido a una mayor eficiencia del calefactor, no sean directamente consideradas como una alternativa viable para los usuarios.

En conclusión, las mejoras en el diseño se presentan como una alternativa realista para reducir las emisiones de los calefactores, especialmente cuando se enfrentan a regulaciones más estrictas. Estas mejoras permiten a los fabricantes o importadores cumplir con

normativas específicas. En contraste, la implementación de tecnologías de abatimiento implica un mayor costo, lo que actualmente las convierte en una opción difícil de asumir para los fabricantes o importadores. No obstante, este panorama podría cambiar con el tiempo a medida que los costos de la tecnología disminuyan.

9. Etapa 4: Evaluar las emisiones de los artefactos normados y sus efectos

9.1. Efectos en la salud del uso de calefacción a leña y pellet

La combustión a leña es una fuente más de contaminación en el país, y en efecto, el energético más usado en Chile para la calefacción o para la preparación de alimentos, la cual aumenta su utilización en los meses de invierno debido a las bajas temperaturas. La combustión a leña emite altos niveles de material particulado al aire, afectando no solo al exterior, sino también al interior de los hogares en los que se utilizan. Alrededor de 4 millones de personas mueren al año a causa de la contaminación del aire interior, en su mayoría mujeres y niños que pasan gran parte de su tiempo cerca de la estufa, inhalando el humo tóxico (CCAC, 2016).

Entre los contaminantes producidos por la leña están el $MP_{2,5}$, MP_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , y CO , que afectan según estudios y evidencia a la calidad del aire y a la salud de las personas expuestas a ellos. Según información en tiempo real del índice de calidad del aire y contaminación atmosférica por $MP_{2,5}$ (ICA)⁸⁵; de las 10 ciudades más contaminadas del país 8 de ellas pertenecen a las zonas centro y sur, las cuales presentan valores elevados de material particulado en suspensión, los que por su diminuto tamaño no pueden ser filtradas por la nariz o por el sistema respiratorio superior, pudiendo llegar directamente a los pulmones o al torrente sanguíneo, donde pueden ser contenidas por meses y generar complicaciones de salud.

Un informe del “Department of Ecology”⁸⁶ del estado de Washington menciona ciertas enfermedades que pueden desarrollar las personas expuestas al humo de leña dependiendo del tiempo de exposición, por ejemplo, a corto plazo se puede desarrollar; irritación de ojos, garganta, senos nasales y pulmones, dolores de cabeza, función pulmonar reducida, inflamación o hinchazón pulmonar, mayor riesgo de enfermedades en las vías respiratorias, y síntomas agravados de enfermedades pulmonares preexistentes, como asma, enfisema, neumonía y bronquitis. A largo plazo se puede desarrollar enfermedad

⁸⁵ [Índice de calidad del aire \(ICA\) e Información sobre la contaminación del aire en Chile | IQAir](#)

⁸⁶ [How Wood Smoke Harms Your Health \(yakimacleanair.org\)](#)

pulmonar crónica, incluyendo bronquitis y enfisema, cambios químicos y estructurales en los pulmones, y también cáncer.

De la misma forma, un estudio de la Universidad de Chile llamado “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, indica los problemas asociados a la salud en el corto y largo plazo en el sistema respiratorio, como puede verse en la siguiente Tabla 34:

Tabla 34, Efectos respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña

Contaminante	Efecto respiratorio corto plazo	Efecto respiratorio largo plazo
MP₁₀ MP_{2,5}	<ul style="list-style-type: none"> ❖ disminución en la función pulmonar ❖ fagocitosis y depuración mucociliar ❖ síndrome bronquial obstructivo 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Menor desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio ❖ Mayor riesgo de cáncer en la edad adulta HAPs
Ozono (O₃)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ disminución de frecuencia respiratoria y disminución de CVF y VEF₁ ❖ alveolitis neutrofílica 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Daño células epiteliales
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Hiperreactividad ❖ Aumento de síntomas respiratorios y exacerbaciones de asma ❖ Aumenta la respuesta a la provocación con alérgenos ❖ Disminución de la actividad mucociliar 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Posible decremento del desarrollo pulmonar
Dióxido de azufre (SO₂)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ obstrucción bronquial: ❖ hipersecreción bronquial: 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Bronquitis crónica
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ disminución en la capacidad de ejercicio 	

Fuente: elaboración propia, información proporcionada por “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, (Oyarzún, 2010).

También muestra los efectos no respiratorios de la contaminación del aire, en primer lugar, el efecto en el sistema cardiovascular, en segundo lugar, el efecto en el sistema nervioso central y autónomo, y, en tercer lugar, el efecto en la unidad materno fetal (ver Tabla 35 Tabla 36 y Tabla 37).

Tabla 35 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña

Contaminante	Efecto en sistema cardiovascular
Material particulado	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Disminución de la variabilidad en la frecuencia cardiaca ante el estrés
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Interferencia del transporte de O₂ por la hemoglobina
Ozono (O₃)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Comunicación interventricular

Fuente: elaboración propia, información proporcionada por “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, (Oyarzún, 2010).

Tabla 36 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña

Contaminante	Efecto en sistema nervioso central y autónomo
Monóxido de Carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cefalea, irritabilidad, disminución de percepción auditiva y visual. Compromiso

Contaminante	Efecto en sistema nervioso central y autonómico
	progresivo y letal de conciencia en concentraciones altas
Ozono (O₃)	❖ Daño cerebeloso en células de Purkinje

Fuente: elaboración propia, información proporcionada por “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, (Oyarzún, 2010).

Tabla 37 efectos no respiratorios por contaminación del aire por combustión de leña

Contaminante	Efecto en unidad materno fetal
Monóxido de carbono (CO)	❖ Bajo peso de nacimiento ❖ Baja talla al nacer

Fuente: elaboración propia, información proporcionada por “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, (Oyarzún, 2010).

A propósito del estudio anterior, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) menciona que la exposición a material particulado podría afectar tanto a los pulmones como al corazón, dentro de varios otros problemas, como, por ejemplo, muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, infartos de miocardio no mortales, latidos irregulares, asma agravada, función pulmonar reducida, síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar, entre otras.

En el caso de infartos al miocardio, hay un estudio publicado en “Epidemiology” llamado “Biomass Burning as a Source of Ambient Fine Particulate Air Pollution and Acute Myocardial Infarction”¹²⁷, el cual fue realizado en Canadá el año 2017, resultando una asociación a corto plazo entre el aumento de MP_{2,5} con un mayor riesgo de infarto de miocardio entre los sujetos de edad avanzada.

Las poblaciones de riesgo con mayor probabilidad de verse afectadas incluso en niveles bajos de contaminación del aire son los bebés y niños, los ancianos, y los adultos con afecciones cardíacas o pulmonares previas (Ecology, 2012). Bajo la misma lógica de riesgo hay un estudio realizado por Bohórquez (2017), que indica una tendencia predominante en los casos de enfermedades respiratorias “en los pacientes de primera infancia y las personas mayores, ya que estos grupos poseen sistemas inmunes con menores defensas, y son más susceptibles a la ocurrencia de enfermedades en general” (ver Figura 35). También menciona que la contaminación por el uso de leña puede causar otras enfermedades asociadas al proceso del embarazo, cáncer en las vías respiratorias y afecciones oculares.

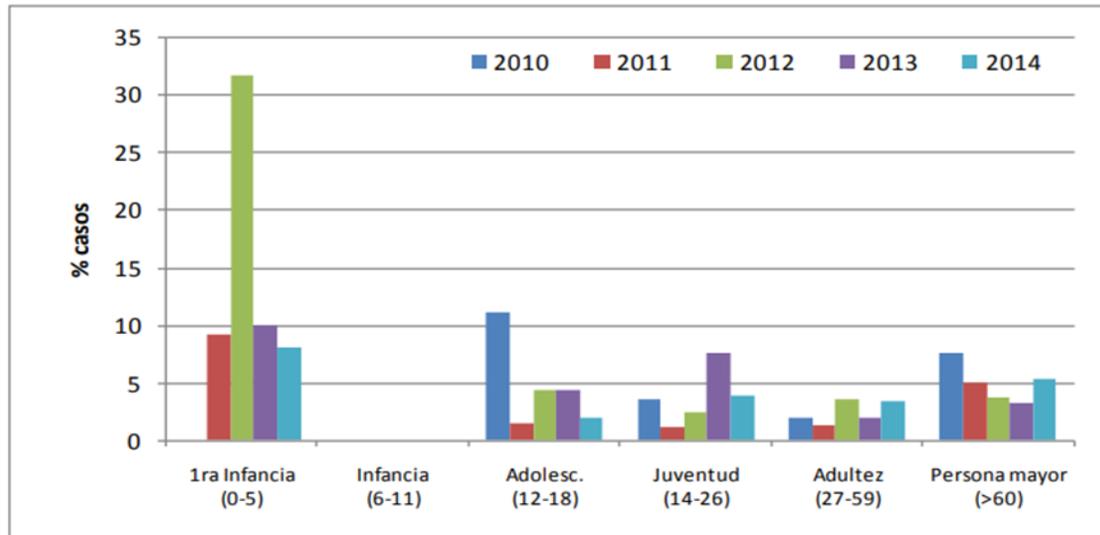


Figura 35. Porcentaje de casos de enfermedades respiratorias reportados en el municipio. Fuente: E.S.E Centro de salud Santa Sofía, 2015.⁸⁷

Para esta población sensible, el ICA tiene ciertas recomendaciones como reducir el ejercicio al aire libre, llevar mascarilla en el exterior, y cerrar ventanas para evitar el aire sucio de fuera, aunque con esto último algunos sostengan que las partículas son tan pequeñas que de igual forma pueden transitar hacia el interior de los hogares y afectar a la salud.

El problema pareciera estar ligado a la utilización de leña como fuente energética, debido a que en muchos casos estas están obsoletas, o son hechizas, lo que significa que no tienen la regulación desde la autoridad para ser utilizadas. “En este sentido, se ha comprobado que la optimización de los sistemas de combustión de leña, su mantención y funcionalidad mejora ostensiblemente la calidad de aire interior. Del mismo modo, el reemplazo de sistemas y artefactos de calefacción por otros nuevos y certificados reduce las concentraciones de MP_{2,5}” (René Barria, Mario Calvo, Paulina Pino, 2016). De hecho, un estudio de la Universidad de Talca (2021), sobre el uso de calefacción a pellets en comparación con el uso de calefacción con leña, obtiene un 13 % menos de exposición a material particulado MP_{2,5} al interior de la vivienda usando pellets, como muestra la figura.

⁸⁷ Bohórquez, 2017.

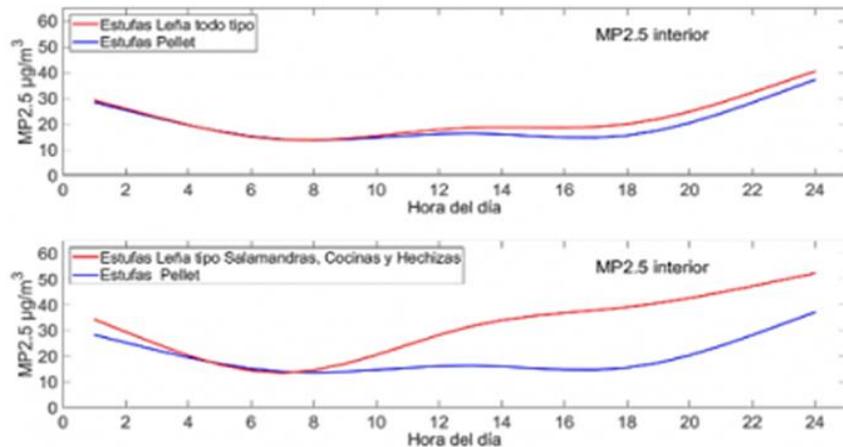


Figura 36, Mediciones promedio de la calidad del aire en el interior del hogar a lo largo del día-Talca. En rojo hogares con estufa a leña, en azul los hogares con estufa a pellets

Sin embargo, aun cuando pueda ser más beneficioso la utilización de pellets, según el estudio mencionado, se debe resguardar al igual que con la leña, la calidad del mismo y también la certificación de calidad, las revisiones y limpiezas necesarias para que funcione en perfectas condiciones, puesto que, de lo contrario la combustión de pellets puede producir Monóxido de Carbono (CO), lo que puede generar intoxicaciones graves, problemas respiratorios, alergias, o incluso asma (Barrantes, 2023).

Hay evidencias sobre la contaminación del aire al interior de los hogares y su relación con las enfermedades respiratorias y no respiratorias que pueden presentar las personas expuestas al humo de la combustión de leña. Tomando en cuenta que al menos un tercio de las muertes de personas por contaminación del aire “se deben a la quema de biomasa en calefacción y cocina de los hogares, de ellas mayoritariamente se producen en Asia, África y también en Sudamérica” (Marchant, 2023), se debe tener en cuenta el traspaso a fuentes de calefacción más limpias y seguras dentro de los hogares para evitar complicaciones de salud a corto y largo plazo.

Partículas contaminantes

MP: Contaminante atmosférico que corresponde a aquellas partículas que se encuentran en suspensión. Pueden llegar a la profundidad de los pulmones e incluso al torrente sanguíneo⁸⁸.

MP_{2,5}: Material particulado respirable de diámetro menor o igual a 2,5 micrómetros. Es 100 veces más delgado que un cabello humano

MP₁₀: Material particulado respirable de diámetro por lo general, 10 micrómetros

⁸⁸ [Conceptos básicos sobre el material particulado \(MP, por sus siglas en inglés\) | US EPA](#)



O₃: Ozono: Es el principal contaminante fotoquímico y se origina principalmente en las áreas urbanas por varias fuentes de emisión, como los automóviles y la industria. Actúa como un contaminante tóxico para la salud humana, produciendo daños respiratorios y pulmonares como la inflamación de sus tejidos, dolores de pecho, irritación de la garganta y ojos, aumento de afecciones asmáticas, empeoramiento de enfermedades preexistentes del corazón, ataques de tos, jadeo, dificultades de respiración en la realización de ejercicios y alteraciones en el sistema de defensa inmunológica de una persona⁸⁹.

NO₂: Dióxido de Nitrógeno: es un contaminante atmosférico, y en niveles elevados puede irritar los pulmones y disminuir su capacidad funcional. La irritación que provoca este contaminante se relaciona con una importante inflamación de las vías respiratorias y una mayor mucosidad, lo que supone un aumento de la reactividad bronquial favoreciendo la aparición de infecciones respiratorias, como bronquitis, especialmente en mayores e inmunodeprimidos, así como bronquiolitis en niños⁹⁰.

SO₂: Dióxido de Azufre: El dióxido de azufre es un gas bastante estable, incoloro, no inflamable y muy soluble en agua. Entre los efectos que produce sobre la salud humana, se encuentra la irritación de ojos, mucosas y piel, y afecciones en el aparato respiratorio⁹¹

CO: Monóxido de carbono: Es un gas inodoro e incoloro que puede causar la muerte. Se produce cada vez que se enciende algún combustible como gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, madera o carbón. La exposición continua puede producir síntomas de gripe, incluidos dolores de cabeza más fuertes, mareos, cansancio, náuseas, confusión, irritabilidad y pensamiento confuso, falta de memoria y coordinación⁹².

9.2. Metodología de cálculo de relación entre emisión de contaminantes y su concentración en la atmósfera.

Dado un supuesto de relación lineal entre las emisiones y concentraciones de contaminación atmosférica, se realiza el cálculo del “factor emisión-concentración” denominado FEC, de las emisiones atribuidas a la calefacción a leña en relación en las distintas comunas del país en función de las condiciones atmosféricas promedio de cada una de estas, en base al documento “Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire” MMA 2012⁹³. La fórmula de cálculo de esta relación se muestra en la ecuación, donde FEC_i^t es el factor emisión-concentración para una zona i en un año t medido en ($ton/\mu g/m^3$), el término C_i^t la concentración ambiental de cada contaminante en

⁸⁹ [OZONO TROPOSFÉRICO - IDEAM](#)

⁹⁰ [Dióxido de nitrógeno y Salud - Página de Salud Pública del Ayuntamiento de Madrid \(madridsalud.es\)](#)

⁹¹ [Calidad del aire \(gobiernodecanarias.org\)](#)

⁹² [Monóxido de carbono | US EPA](#)

⁹³ https://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-54447_Guia_MetodologicaCalidadAire25072013.pdf

particular del cálculo para una zona i en un año t medido en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y E_i^t la emisión del contaminante en particular del cálculo para una zona i en un año t medido en (ton).

$$FEC_i^t \left(\frac{\text{ton}}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right) = \left(\frac{\partial C_i^t (\mu\text{m}^3)}{\partial E_i^t (\text{ton})} \right)^{-1} \approx \left(\frac{E_i^t (\text{ton})}{C_i^t (\mu\text{g}/\text{m}^3)} \right) \quad (1)$$

Los datos requeridos para realizar el cálculo del FEC de cada contaminante son:

- Las emisiones provenientes de la calefacción a leña y sus derivados en calefacción residencial.
 - Perfil de consumo del energético por cada zona de interés en un año (kilogramos consumidos).
 - $CL_{total,i,j}$: Consumo de leña total de los artefactos “ j ” para cada zona “ i ” (kilogramos consumidos)
 - $CE_{S,i,j}$: Consumo de leña seca de los artefactos “ j ” para cada zona “ i ” (kilogramos consumidos).
 - $CL_{H,i,j}$: Consumo de leña húmeda de los artefactos “ j ” para cada zona “ i ” (kilogramos consumidos).
 - $CL_{MO,i,j}$: Consumo de leña por mala operación para cada zona “ i ” (kilogramos consumidos).
 - Perfil de operación de la calefacción:
 - PBO_i : Porcentaje de buena operación para cada zona “ i ”.
 - PMO_i : Porcentaje de mala operación para cada zona “ i ”.
 - PLS_i : Porcentaje de uso de leña seca para cada zona “ i ”.
 - $PLSH_i$: Porcentaje de uso de leña semi húmeda para cada zona “ i ”.
 - PLH_i : Porcentaje de uso de leña húmeda para cada zona “ i ”.
 - Factor de emisión de las fuentes:
 - $FEMO_{j,k}$: Factor de emisión del contaminante “ k ” por mala operación de los artefactos “ j ” en g/kg (gramos de contaminantes por kilogramo de leña utilizada)
 - $FELS_{j,k}$: Factor de emisión del contaminante “ k ” por uso de leña seca de los artefactos “ j ” en g/kg (gramos de contaminantes por kilogramo de leña utilizada)
 - $FELH_{j,k}$: Factor de emisión del contaminante “ k ” por uso de leña húmeda de los artefactos “ j ” en g/kg (gramos de contaminantes por kilogramo de leña utilizada)
- CAC_i^k : Concentraciones ambientales de cada contaminante “ k ” para cada zona “ i ”, en relación con la proporción de cada uno.

9.2.1. Determinación de las emisiones de contaminantes por uso de calefacción residencial a leña y sus derivados

En primera instancia, para calcular las emisiones de cada contaminante es requerido determinar el consumo del energético por uso de leña seca $CLS_{i,j}$, el consumo por leña húmeda $CLH_{i,j}$ y el consumo de leña por mala operación $CLMO_{i,j}$, dadas las condiciones características del perfil de uso de la calefacción, siguiendo la siguiente fórmula:

$$CLS_{i,j} = CLtotal_{i,j} \cdot PBO_i \cdot PLS_i \quad (2)$$

$$CLH_{i,j} = CLtotal_{i,j} \cdot PBO_i \cdot PLSH_i + CLtotal_{i,j} \cdot PBO_i \cdot PLH_i \quad (3)$$

$$CLMO_{i,j} = CLtotal_{i,j} \cdot PMO_i \cdot PLS_i + CLtotal_{i,j} \cdot PMO_i \cdot PLSH_i + CLtotal_{i,j} \cdot PMO_i \cdot PLH_i + \quad (4)$$

Donde los consumos del energético total, fueron extraídos del inventario de emisiones, con alcance comunal⁹⁴. Además, se extrajo el porcentaje de uso de leña seca, semi-húmeda y húmeda para realizar las ponderaciones de cada una y los porcentajes de uso de la calefacción por buena y mala operación.

Posteriormente se realiza el cálculo de las emisiones en relación con la siguiente fórmula:

$$E_{i,j,k} = CLS_{i,j} \cdot FELS_{j,k} + CLH_{i,j} \cdot FELH_{j,k} + CLMO_{i,j} \cdot FEMO_{i,j} \quad (5)$$

Donde los factores de emisión utilizados para determinar las emisiones de cada contaminante y tipo de calefactor fueron extraídos del estudio de SICAM "Fuentes de Área: Combustión Residencial de Leña"⁹⁵. Los factores utilizados se muestran en la siguiente tabla:

⁹⁴ Fuente: "Estudio de antecedentes para la revisión de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable (MP_{2,5})"

⁹⁵ <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=273f2964-2e7c-4a69-88ab-d21ebc8cba08&fname=Actualización%20inventario%20emisiones%20zona%20saturada%20Valle%20Central%20Región%20de%20O'Higgins.pdf&access=public>

Tabla 38, Factores de emisión para material particulado y varios gases para estufas a leña.

Artefacto FE	Contaminante	Llave	Leña seca [g/kg]	Leña húmeda [g/kg]	Mala operación [g/kg]
Cocina a leña	MP ₁₀	Cocina a leña	7,5	13,9	33,8
Combustión lenta S/T		Combustión lenta S/T	6,2	11,8	45,8
Combustión lenta C/T		Combustión lenta C/T	5,2	11,0	29,5
Salamandra		Salamandra	12,7	28,5	-
Chimenea		Chimenea	10,1	28,5	-
Calefactor certificado		Calefactor certificado	2,5	11,0	11,0
Calefactor a pellet		Calefactor a pellet	1,9	-	-
Cocina a leña	MP _{2,5}	Cocina a leña	7,0	13,0	31,5
Combustión lenta S/T		Combustión lenta S/T	5,8	11,0	42,6
Combustión lenta C/T		Combustión lenta C/T	4,9	10,2	27,5
Salamandra		Salamandra	11,8	34,1	-
Chimenea		Chimenea	9,2	26,6	-
Calefactor certificado		Calefactor certificado	2,3	10,2	10,2
Calefactor a pellet		Calefactor a pellet	1,8	-	-
Cocina a Leña	NO _x	Cocina a leña	2,1	2,7	2,7
Combustión lenta ST		Combustión lenta S/T	2,0	3,0	3,0
Combustión lenta CT		Combustión lenta C/T	1,9	2,0	2,0
Salamandra		Salamandra	7,7	3,1	-
Chimenea		Chimenea	1,3	1,3	-
Calefactor certificado		Calefactor certificado	1,9	2,0	5,3
Calefactor a pellet		Calefactor a pellet	1,9	-	-
Cocina a Leña	SO ₂	Cocina a leña	0,2	0,2	0,2
Combustión lenta ST		Combustión lenta S/T	0,1	0,0	0,2
Combustión lenta CT		Combustión lenta C/T	0,1	0,0	0,0
Salamandra		Salamandra	0,2	0,2	-
Chimenea		Chimenea	0,2	0,2	-
Calefactor certificado		Calefactor certificado	0,1	0,0	0,0
Calefactor a pellet		Calefactor a pellet	0,00	0,00	0,00

Artefacto FE	Contaminante	Llave	Leña seca [g/kg]	Leña húmeda [g/kg]	Mala operación [g/kg]
Cocina a Leña	NH ₃	Cocina a leña	0,001025	0,001025	0,001025
combustión lenta ST		Combustión lenta S/T	0,001025	0,001025	0,001025
combustión lenta CT		Combustión lenta C/T	0,001025	0,001025	0,001025
Salamandra		Salamandra	0,001025	0,001025	0,001025
Chimenea		Chimenea	0,001025	0,001025	0,001025
Calefactor certificado		Calefactor certificado	0,001025	0,001025	0,001025
Calefactor a pellet		Calefactor a pellet	0,001025	0,001025	0,001025

Las emisiones base fueron calculadas utilizando la información suministrada de consumos de leña entregados por la contraparte y lo expuesto en la Ecuación (5) para cada comuna del país y escenario normativo propuesto.

9.2.2. Determinación de la concentración atmosférica de contaminantes.

Para determinar la concentración de los contaminantes en la atmósfera, se utilizó como base los datos suministrados por la contraparte técnica de la Subsecretaría del Medio Ambiente. La cual utiliza ponderadores para los contaminantes subdivididos por zonas del país (norte, centro y sur), dados por la siguiente distribución:

Tabla 39, Distribución de los contaminantes en la atmósfera, según zona del país.

NH ₃	NO _x	SO ₂	MP ₂₅	MP	MP ₁₀	MP _{25rS}	MPrs	MP _{10rS}	Total	Fuente	Zona
10%	14%	3%	67%	0%	0%	5%	0%	0%	99%	Rizzi De La Maza 2017	Centro
1%	3%	1%	83%	0%	0%	0%	0%	0%	88%	CMM 2019	Sur
5%	7%	50%	34%	0%	0%	3%	0%	0%	98%	587_1_Folio_N_1_al_380.pdf (mma.gob.cl)	Norte

Para determinar la concentración de cada contaminante en términos del volumen estimado, se utilizaron datos del total de contaminantes atmosféricos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entregados por la contraparte en base a datos medidos por las estaciones de monitoreo de la red SINCA, datos satelitales y proyecciones.

De esta forma, la concentración en la atmósfera $C_{i,k}$, para “i” zona y “k” contaminante es calculada a partir de la siguiente formula:

$$C_{i,k} = C_{total} \cdot PC_{i,k} \quad (6)$$

Donde C_{total} es la concentración total de contaminación en la atmósfera medida $\mu g/m^3$ y $PC_{i,k}$ el porcentaje de cada contaminante “k”, para cada zona “i”, dada la Tabla 39. Este cálculo fue realizado para cada comuna del país.

10. Análisis de nuevos escenarios normativos.

En base a la información recopilada, de los países europeos, Estados Unidos, Canadá y Australia/Nueva Zelanda. Los actuales criterios para implementar limitaciones a las emisiones de contaminantes provenientes de la combustión en estufas de biomasa se basan en que se implementen mejoras a los artefactos y a la estandarización del energético. En base a esto, se realizó una comparativa de los estándares internacionales que reflejaron la condición actual de Chile respecto al resto del mundo.

10.1. Aspectos a considerar en las propuestas de escenarios normativos

10.1.1. Contaminantes a regular

Los contaminantes normados en el mundo para establecer límites de emisión de los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera, van desde las partículas sólidas MP hasta gases de la combustión, cómo el CO, NO_x y COV. Estos tienen distintos métodos para su cuantificación, cómo se ha comentado en capítulos anteriores, el MP se recolecta mediante filtros o sistemas de túnel de dilución, mientras que el resto son medidos mediante analizadores de gases, los cuales, dependiendo de equipo, están enfocados a determinar un tipo de contaminante en particular.

Por medio de entrevistas técnicas a la jefatura de laboratorios de Cesmec (actualmente el único laboratorio con aprobación de certificación de calefactores), han indicado que no cuentan con el equipamiento para realizar las mediciones de los gases, por tanto, esto implicaría en costos adicionales para ellos y de los procesos de certificación de la empresas importadoras y fabricantes de calefactores. También indicaron, que un cambio en los protocolos establecidos por la SEC, implican procesos de renovación de autorización del laboratorio con el INN, con su costo asociado.

De esta forma, agregar a la norma chilena la regulación de nuevos contaminantes implicaría un aumento en los costos de certificación, por adquisición de equipamiento y renovación



de autorización de funcionamiento del INN. Además, conllevaría a aumentar la barrera de entrada de nuevos laboratorios de certificación, por el aumento de los costos del equipamiento.

En Estados Unidos, se norma únicamente al respecto del MP, ya que una reducción directa en el material particulado tiene un efecto directo en la reducción del resto de contaminantes, dado que se mejora la calidad de la combustión⁹⁶.

Por tanto, en las propuestas normativas que serán desarrolladas en próximos puntos, no se establece el agregar otro contaminante a la norma, principalmente por lo indicado en la EPA, ya que, una reducción del MP implica en una reducción directa del resto de contaminantes, además cabe mencionar que requeriría actualizar el protocolo de medición, lo que implica en un aumento en los costos de certificación.

10.1.2. Nuevos parámetros a considerar

Dado el estudio del mercado de calefactores a leña y pellet comercializados a nivel nacional realizado en el capítulo 7.1.2, se determinaron aspectos de interés que serán considerados para los escenarios normativos a desarrollar. En primera instancia, se observó, que no existe una relación funcional entre la potencia de los calefactores y las emisiones medidas en laboratorio, aspecto que sugiere que dados los actuales límites de emisión establecidos en el D.S. N°39 del MMA, se puede establecer una limitación de las emisiones que sea independiente de la potencia térmica de los calefactores. En consecuencia, el análisis de los calefactores que se han certificado en los últimos cinco años, que están dentro del rango de potencias de entre 8kW y 14kW, mostró que el 98% de las estufas a leña, presentan emisiones menores o iguales a 2,5 g/h, mientras que para las estufas a pellet la cantidad es del 99% del total para el mismo límite de emisión, pese a que su limitación sea de 3,5 g/h. Este resultado entrega el antecedente de que el límite de emisiones de los calefactores de entre 8kW y 14 kW, puede ser modificado sin mayor efecto en el mercado actual.

Al respecto de los equipos que conciernen a la normativa actual, el análisis del mercado mostró que la mayor cantidad de equipos certificados se centra en el rango de entre 8kW y 14kW, con cerca del 68%, mientras que segmento de menor magnitud es el de entre 14kW y 25kW, con un 0,7% del total, entre 7.000 y 8.000 equipos que entran al mercado anualmente. Este aspecto sugiere que la problemática respecto a las emisiones por calefacción está centrada en los artefactos de potencias media y baja, y que los equipos de mayor potencia son un sector minoritario de esta. Dado esto, las propuestas normativas, tendrán como foco limitar las emisiones del actual rango de artefactos, equipos de hasta 25kW de potencia.

⁹⁶ <https://www.epa.gov/residential-wood-heaters/fact-sheet-summary-requirements-woodstoves-and-pellet-stoves>

Respecto a la eficiencia de los equipos, se consideran los mismos valores de la norma actual.

10.1.3. Unidad de medición a utilizar

En el proceso de búsqueda, se identificó que los calefactores son normados respecto a variedad de unidades de medición, en la actualidad en Chile se cuantifica en g/h, unidad heredada del método 5G de la EPA, establecido en el método CH-5G. En la Unión Europea se utiliza una cuantificación de la concentración en mg/m³, con la alternativa de utilizar g/kg, donde esta última es también utilizada en Australia y Nueva Zelanda.

En base a los resultados de las certificaciones de los equipos normados en Chile (proporcionados por una de las empresas fabricantes de calefactores a leña), se notó que, la utilización de la unidad g/h puede provocar una distorsión en los resultados los ensayos de laboratorio, ya que, a tasas de quemado lento, el proceso completo de la recolección de MP tiene una mayor duración, mientras que, a tasas de quemado altas, los tiempos son menores, sumado a un aumento en las emisiones por menos tiempo de residencia de los humos dentro de la cámara de combustión.

Por otro lado, la unidad de g/kg, tiene directa relación en la eficiencia de la combustión de leña o pellet, dado que cuantifica directamente las emisiones de una cantidad fija de energético. Además, este tipo de unidades son utilizadas para la cuantificación de las emisiones provenientes de este tipo de fuentes.

Dado todo lo anterior, se realizarán dos propuestas de unidades bajo escenarios normativos, que serán desarrollados en próximos puntos, con base a una propuesta al corto plazo manteniendo la unidad g/h, para establecer nuevos parámetros y una propuesta al mediano-largo plazo, del uso de g/kg, para la cuantificación de las emisiones.

10.2. Descripción general de la base para un nuevo protocolo de ensayo

En base a la búsqueda internacional realizada y a los antecedentes tanto de estudios nacionales como de los resultados de los ensayos de laboratorio, se observó una deficiencia en el método actual para la determinación de las emisiones provenientes de los calefactores, específicamente en los referentes al método CH-28 o protocolo de medición de estufas a leña y pellet. **A modo general, el método actual realiza las mediciones en condiciones muy específicas, que no reflejan la realidad del uso dentro de una vivienda,** dado que estas se inician después de un proceso de calentamiento previo del calefactor o que no se cuantifican las emisiones en los procesos de recarga, donde el calefactor pierde temperatura y se liberan mayor cantidad de emisiones. Estas situaciones difieren enormemente de las condiciones reales de uso y no permiten cuantificar sus emisiones reales. Es por todo esto y en base a un método aceptado por la EPA, que se propone migrar a un nuevo método de medición que sustituya al CH-28, por uno basado en el método IDC

establecido en ALT-140 de la EPA⁹⁷. Este proceso puede ser llevado a cabo con un primera etapa aplicando lo actualmente aprobado por la Epa, que refiere a un método alternativo de uso de energético, por leños (cordwood), donde se establece un nuevo límite para las emisiones, permitiendo que esta sea de hasta 2,5 g/h, el detalle de este método se encuentra en el ANEXO 14. Este primer paso no obstruye la aplicación de un método basado en el IDC, ya que este también considera la utilización de “cordwood” como energético para las mediciones de calefactores a leña, lo que según el NSPS, ha mostrado que representa de mejor forma las emisiones reales de los calefactores y da una mayor información a los consumidores acerca de los calefactores⁹⁸.

Cabe mencionar que la EPA, está en trabajos para reemplazar el método actual de pruebas para determinar el MP de las estufas, basándose en el protocolo IDC establecido por el NYSERDA de Estados Unidos, los cuales están realizando mesas de trabajo e intercambio de información para establecer el nuevo método⁹⁹.

10.3. Aspectos a considerar en las propuestas de escenarios normativos

Como se ha anunciado anteriormente, el D.S. N°39 del 2011, del MMA, establece la norma de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera que se encuentra vigente actualmente. Esta norma junto con establecer los límites de emisión para calefactores a leña y pellets establece los métodos de ensayo que permiten llevar a cabo la medición de las emisiones de los calefactores.

En la actualidad, se utiliza el método CH28 “DETERMINACION DE MATERIAL PARTICULADO Y CERTIFICACION Y AUDITORIA DE CALEFACTORES A LEÑA”, que está basado en el ensayo de la EPA del mismo nombre (M28), que consiste básicamente en preparar el combustible y los test para determinar las emisiones de material particulado utilizando el método CH-5G (determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución).

Ya en el estudio “Bases para la elaboración del anteproyecto “Norma de Emisión de material particulado respirable (MP10), para artefactos de uso residencial de combustión a leña” (CONAMA; 2006), se establecía que *“el método 28 no refleja condiciones reales de operación. Por razones varias, primero el control del aire no puede ser modificado después del inicio del test; segundo; no hay paradas para la posición del aire para las tasas de quemado media baja y media alta; tercero; el operador o usuario común frecuentemente en la operación real tiende a cerrar la entrada de aire del calefactor manteniendo toda la*

⁹⁷ https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/atm_14_2.pdf

⁹⁸ https://19january2017snapshot.epa.gov/burnwise/cord-wood-and-crib-wood_.html

⁹⁹ <https://www.epa.gov/burnwise/cord-wood-and-crib-wood-testing>

noche encendido el calefactor a una potencia mínima; cuarto; no se incluye el encendido o las cargas de combustible , periodo en que ocurre las mayores tasas de emisión”.

Este diagnóstico es compartido actualmente en Estados Unidos, donde se utiliza una versión modificada del método M28, denominado ASTM 3053-17, que considera principalmente el uso de madera “Cordwood”. o más acorde a la real, pero que, sin embargo, aún no representa las condiciones reales de operación, especialmente las partidas y recargas de combustible que son las que presentan las mayores emisiones.

En este contexto, se observa que el método de ensayo actual (CH28), puede representar más fielmente las emisiones reales de equipos calefactores a pellets, que poseen condiciones de operación estándar (combustible con niveles de humedad definidos, recargas controladas sin disminución de temperatura del equipo, manejo controlado del tiraje, etc.), a diferencia de los calefactores a leña, que de acuerdo al mismo estudio del anteproyecto, existen diferencias de entre 12 y 60 veces las emisiones, entre la operación “ideal” y la “típica”.

Un ejemplo de esto se observa en el estudio “How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions” (Fachinger, 2017) ¹⁰⁰ se midieron las emisiones de calefactores a leña a distintas condiciones de operación y suministros de aire. Las condiciones estudiadas fueron de inicio frío “cold start” (CS), fuego después de arranque en frío “flaming following cold start” (CSF), ardiendo después de arranque frío “smoldering following cold start” (CSS), arranque en caliente “warm start” (WS), en llamas después de arranque en caliente “flaming following warm start” (WSF), En llamas después de un arranque caliente “smoldering following warm start” (WSS), fuego apagado “burnout” (BO). Mientras que las o condiciones de entrada de aire fueron, suministro ideal (#1 y #2), exceso de aire y baja carga y sobre carga de combustible.

Los resultados de este estudio fueron expresados en términos del factor de emisión de contaminantes, para una combinación de operación y suministro de aire, de tal forma que se observan las variaciones de las emisiones bajo cada circunstancia. De los cuales se observó, que para combustión en inicio frío (CS) las emisiones son mayores al resto de condiciones, esto por efectos de menor temperatura dentro de la cámara de combustión, estas emisiones bajan cuando el calefactor que inició en frío logra mayor temperatura en el ensayo (CSF). Por otro lado, las emisiones cuando el calefactor tuvo un arranque en caliente (WS) son menores para un suministro de aire ideal y aumentan con un exceso de aire dentro de la cámara de combustión, esto por efecto de menor tiempo de permanencia de los gases al interior de la cámara, aumentando así las emisiones. Esta última condición se asemeja a

¹⁰⁰<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231017301590#:~:text=It%20was%20shown%20that%20the,and%20organic%20content%20in%20a>

lo medido en la actualidad por el método CH-28, donde el calefactor inicia su proceso de medición desde una temperatura elevada.

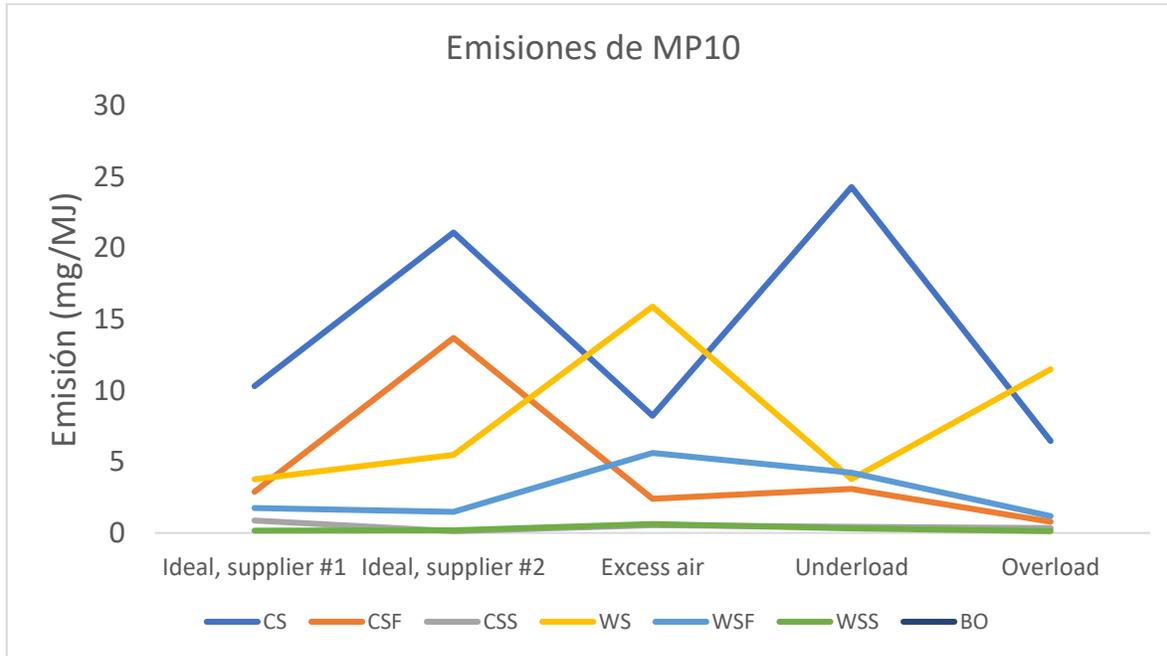


Figura 37. Comparación de emisiones de MP_{10} para distintos escenarios normativos. Donde, inicio frío "cold start" (CS), fuego después de arranque en frío "flaming following cold start" (CSF), ardiendo después de arranque frío "smoldering following cold start" (CSS), arranque en caliente "warm start" (WS), en llamas después de arranque en caliente "flaming following warm start" (WSF), en llamas después de un arranque caliente "smoldering following warm start" (WSS), fuego apagado "burnout" (BO).

De esta forma, es fundamental el trabajo en un nuevo ensayo de preparación de combustible y de test, que permita estimar las emisiones en condiciones reales de operación.

De acuerdo con el levantamiento llevado a cabo por el equipo consultor, alcanzar un ensayo que sea 100% real no es posible, por lo que el enfoque más efectivo es evaluar los calefactores bajo distintos tipos de operación. De esta forma, para representar lo más fielmente posible el funcionamiento de un calefactor en la realidad, se hace necesario operarlo con condiciones variables de operación en términos de tiraje, recarga de combustible y otros, dando suficiente especificidad y detalle de forma que sean resultados reproducibles y permita comparar diferentes modelos.

De esta forma, se han desarrollado protocolos de medición que cumplen estos criterios y que se denominan ensayos de Ciclos Integrados de Trabajo o IDC por sus siglas en inglés.

Estos métodos permiten emular condiciones de uso, en forma repetible y sin mayores costos de ensayos. Dentro de sus ventajas, están:

- Caracteriza la variabilidad con mayor precisión que los métodos actuales de ensayo

- Captura operaciones representativas de altas emisiones, tales como encendido, períodos de recargas y diferentes cargas de combustible
- Incluye mediciones más simples del MP
- Puede aplicarse a ensayos de túnel de dilución sin mayores costos¹⁰¹

A partir de lo anterior, se considera adecuada una actualización de la norma actual de emisión de calefactores, estudiando tres escenarios de límites. Por otro lado, en base a la información recopilada, se recomienda que, en un plazo de 5 años, se establezca un nuevo protocolo de ensayo para la determinación del material particulado, basado en el método IDC aprobado por la EPA, que busca la cuantificación de las emisiones en condiciones de uso reales dentro de una vivienda.

10.4. Propuestas de escenarios normativos

A continuación, se detalla los distintos escenarios normativos a considerar en esta etapa de evaluación.

a) Escenario 1:

- Establecer el límite de emisión para todos los calefactores, tanto de leña como de pellets en 2,5 g/h, independiente de su potencia (0 a 25 kW), tomando en consideración que en la actualidad, el 98% de los calefactores a leña certificados cumplen esta condición y 99% en el caso de los calefactores a pellets. Esto asegura una norma más restrictiva a la actual, que no genera mayores cambios en el mercado.
- Establecer una implementación una vez actualizado el D.S. N°39/2011, del MMA, considerando un plazo de venta del stock actual de equipos a leña y pellet, además de dar tiempo a los fabricantes e importadores de ajustarse a los nuevos límites establecidos. En Estados Unidos se dio un plazo de 5 años para la implementación, pero el cambio de límites fue significativo, de 4,5 g/h a 2,0 g/h¹⁰², por tanto, se sigue un plazo menor en el caso de Chile.

¹⁰¹ Development of an integrated Duty – Cycle Test Method for Cordwood stoves (NYSERDA, 2022).

¹⁰² <https://www.epa.gov/residential-wood-heaters/fact-sheet-summary-requirements-woodstoves-and-pellet-stoves>



b) Escenario 2:

- Establece un cambio de los límites de forma paulatina para los calefactores a leña, los primeros 5 años de aplicabilidad se propone el límite de 2,5 g/h, para su posterior actualización a 2,0 g/h, igualando la norma de Estados Unidos, para equipos de hasta 25 kW de potencia. Mientras que para calefactores a pellet, se propone establecer el límite en 2,5 g/h. Este escenario contempla que los primeros 5 años un 98% de los equipos a leña cumplirían, y posterior al cambio, solo un 42% del total actual.
- Establecer una implementación para equipos a leña del límite 2,5 g/h los primeros 5 años, y una actualización a 2,0 g/h pasado este tiempo, considerando un plazo de venta del stock actual de equipos a leña y pellet, además de dar tiempo a los fabricantes e importados de ajustarse a los nuevos límites establecidos. Se sigue un plazo de implementación menor, además, este debe ser cumplido en dos etapas.

c) Escenario 3:

- Disminuir el límite de emisión, para todas las potencias de los calefactores a leña (0 a 25 kW) a 2,0 g/h de acuerdo a la normativa actual de Estados Unidos. En el caso de los calefactores a pellets, se recomienda mantener el límite de emisión en 2,5 g/h dado que las diferencias de emisiones entre su condición de ensayo y real, no difiere significativamente. En este caso, el 42% de los calefactores a leña actualmente certificados, no podrían ingresar al mercado.
- Establecer una implementación una vez actualizado el D.S. N°39/2011, del MMA, considerando un plazo de venta del stock actual de equipos a leña y pellet, además de dar tiempo a los fabricantes e importados de ajustarse a los nuevos límites establecidos.

d) Escenario 4:

- Disminuir el límite de emisión, para todas las potencias de los calefactores a leña (0 a 25 kW) a 1,6 g/h más restrictivo que la norma actual de Estados Unidos, donde el 87% de los calefactores a leña certificados no podrían ser comercializados. En el caso de los calefactores a pellets, se recomienda mantener el límite de emisión en 2,5 g/h dado que las diferencias de emisiones entre su condición de ensayo y real, no difiere significativamente.
- Establecer una implementación una vez actualizado el D.S. N°39/2011, del MMA, considerando un plazo de venta del stock actual de equipos a leña y pellet, además de dar tiempo a los fabricantes e importados de ajustarse a los nuevos límites establecidos.

Propuesta de cambio de protocolo de ensayo: en forma paralela, se propone modificar el ensayo actual CH-28, por uno que considere las condiciones reales de operación, y establecer límites de emisión acordes, que permitan estimar de la forma más real posible, las emisiones de los calefactores a leña.

Una paso intermedio a un método que pueda cuantificar las emisiones de forma cerca a la realidad basado en el IDC, es el cambio en la utilización de leña en las pruebas, según lo indicado en el ANEXO 14, donde se utilizan troncos de leña de similares características a las usados por los hogares. Esto sugiere una actualización del protocolo de ensayo CH-28, específicamente a lo indicado para el energético, dimensiones y suministro. Donde se recomienda tomar como base lo indicado por la EPA en el documento E2780-10(2017)¹⁰³.

La alternativa final es considerar el método IDC, descrito en el ALT-140 de la EPA¹⁰⁴. Donde se han considerado los siguientes plazos para el desarrollo de un nuevo ensayo:

- Estudios preliminares de estimación de límites de emisión bajo nuevos ensayos (12 a 24 meses).
- Factibilidad de implementación de nuevos ensayos: si bien en la práctica no requieren mayores inversiones, si pudieran existir modificaciones en la cantidad y días de ensayo, lo que podría encarecer los costos de certificación. Por esta razón se recomienda socializar la posibilidad de implementar nuevos ensayos, en los laboratorios que actualmente llevan a cabo estas certificaciones (CESMEC). (6 meses).
- Desarrollo de una nueva norma de ensayo (homologación o creación) y consulta pública (1-2 años).

Propuesta de nuevos artefactos: En la actualidad no se contemplan en la norma las cocinas a leña, por tanto, es relevante considerarlos en futuras revisiones de la norma. De las reuniones que se llevaron a cabo para levantar antecedentes, se indicó por parte de Cesmec, que es requerido que exista un protocolo de medición de cocinas a leña. Este debe considerar la medición en las condiciones actuales de túnel de dilución, además de indicar los formatos del combustible y suministro de este. Seguido al protocolo, es requerido que se establezcan límites de emisión para estos artefactos, que den cuenta de las emisiones con el protocolo que se debe desarrollar. Para lograr estos objetivos, se propone:

- Desarrollar un protocolo de ensayo en conjunto al anteriormente propuesto para estufas a leña, que busque la medición en condiciones reales de uso. Bajo consulta pública, paneles de expertos y homologación del protocolo (1-2 años).

¹⁰³ E2780-10(2017) "Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters"

¹⁰⁴ https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/atm_14_2.pdf

- Estudios para determinar las emisiones de las cocinas a leña, en función del nuevo protocolo establecido (1-2 años).
- Creación o adición a la norma, los límites de emisión de estos artefactos.

10.4.1. Antecedentes a considerar en un cambio normativo

De acuerdo a lo indicado en la sección 6.14, cuando se homologan las normas internacionales (utilizando valores promedios) para comparar los límites de emisión de estufas que tienen distintos países, se obtiene lo que indica la Figura 38. En ella, se puede ver que la norma más baja es la de Estados Unidos para carga de leña tipo “Cribwood”, luego está la norma de Australia / Nueva Zelandia, luego está la segunda norma de Estados Unidos (“Cordwood”) y la norma de Chile. Las normas europeas son claramente más altas. Se puede ver que la norma chilena, es una de las más bajas del mundo. Los países que se muestran en la Figura 38 son los únicos que tienen norma de emisión para estufas a leña. Ninguno de los demás países latinoamericanos, asiáticos o de África tiene norma que restringe las emisiones de estufas a leña.

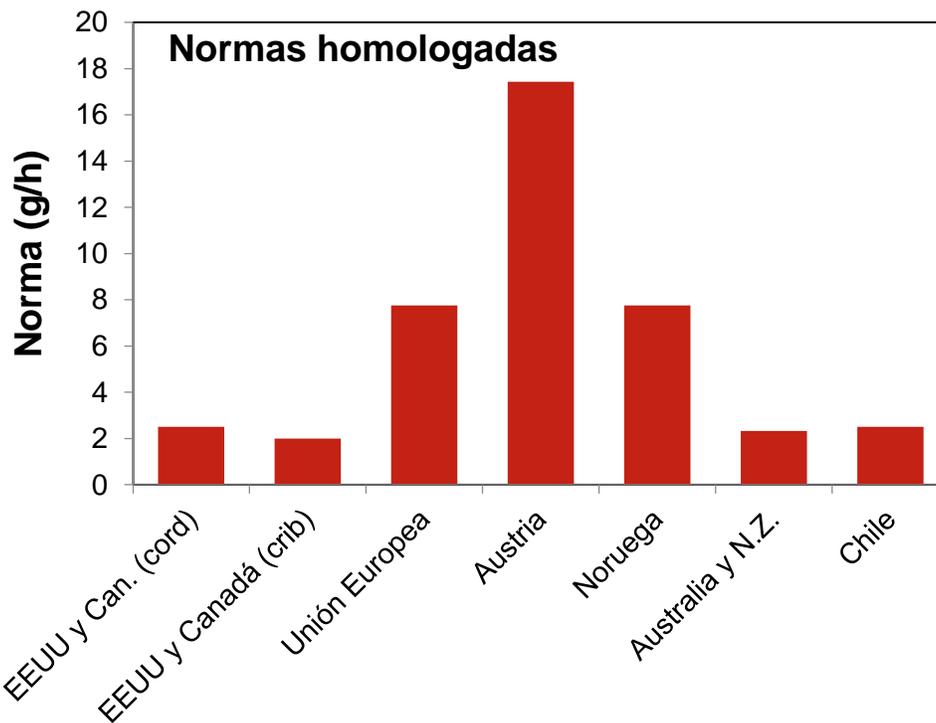


Figura 38. Normas internacionales de emisión de estufas pequeñas homologadas a (g/h)

En general existe una relación aproximadamente lineal entre el límite de emisión de un artefacto a leña y su precio. Es decir, un artefacto a leña de bajo precio tiene altas emisiones

y los artefactos de alto costo tienen bajas emisiones. Como ilustración, una estufa hechiza, es simple de fabricar, usa solo un bidón de metal, un tubo para descarga del humo, su costo es bajo y tiene emisiones de MP_{2,5} del orden de 9,84 g/kg para leña seca, una estufa doble cámara, con control de emisiones tiene 5,07 g/kg de emisiones para la misma leña. Por ello, el precio de la segunda estufa es mayor. Esta relación no se cumple con las estufas certificadas, ya que como lo indica la Figura 24, el precio no está directamente relacionado con las emisiones.

Producto interno bruto per cápita del país.

Por otro lado, la capacidad de las personas para utilizar estufas a leña con bajos niveles de emisión, depende de la capacidad económica que tienen para adquirir y utilizar la estufa. En un país, esto se puede cuantificar en promedio utilizando el ingreso per cápita (PIB per cápita). Esto significa que en promedio, las personas en un país con alto ingreso per cápita pueden adquirir estufas de mayor valor y por consecuencia de menores emisiones.

Una comparación de los ingresos per cápita de los países que tienen normas de emisión para estufas a leña se muestra en la Figura 39. El primer país es Mónaco con 200.000 Eur per cápita, Noruega tiene 101.050 Eur, Estados Unidos tiene un ingreso de 72.710 Eur, Australia tiene 62.673 Eur y Chile tiene un ingreso de 14.640 Eur. De acuerdo a estos números, una familia en Chile tiene 5 veces menos capacidad que una familia en Estados Unidos para comprar una estufa nueva.

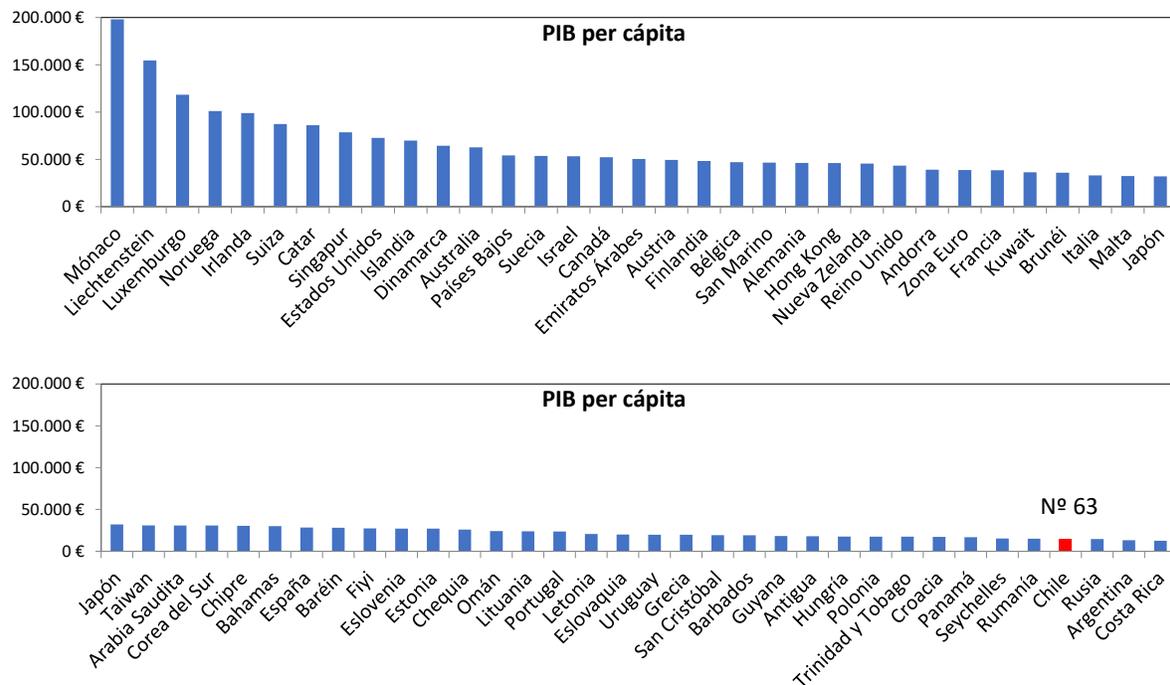


Figura 39. Ingresos per cápita de países del mundo ordenados de mayor a menor. Chile está en el puesto N° 63.

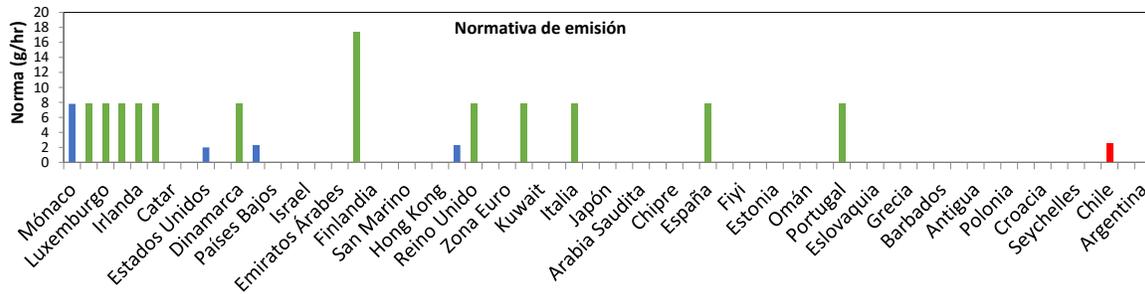


Figura 40. Países que cuentan con normativa de control de emisiones, ordenados por ingreso per cápita.

La Figura 40 muestra que solo los países con alto ingreso per cápita han implementado normativa para restringir las emisiones. Más aún, la normativa europea, no es mandatorio bajo cualquier circunstancia. De acuerdo a lo que indica el **REGLAMENTO (UE) 2015/1185 DE LA COMISIÓN de 24 de abril de 2015, por el que se aplica la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción local de combustible sólido:**

“La Directiva 2009/125/CE dispone que la Comisión establecerá requisitos de diseño ecológico para los productos relacionados con la energía que representen un volumen notable de ventas y de comercio, que tengan un importante impacto medioambiental y que, por su diseño, ofrezcan posibilidades significativas de mejorar ese impacto sin que ello conlleve costes excesivos.”

Es decir, las restricciones en emisiones y requisitos de eficiencia energética aplican a “productos con notable volumen de ventas” y “sin que ello conlleve costes excesivos”. De acuerdo a esto, en Europa, pequeños productores de estufas pueden funcionar sin que cumplan necesariamente las normas de emisiones. Por otro lado, si los costos excesivos, llevan a, por ejemplo, imposibilidad de fabricar estufas, o bajas en las ventas que impidan la comercialización, el reglamento puede no aplicar. Por ello, países de ingresos más bajos como España, Portugal e Italia, pueden no aplicar la normativa o aplicarla parcialmente.

Lo anterior, muestra que existe un “principio de proporcionalidad” en Europa que indica que, si las normas conllevan un costo excesivo, es posible no aplicarlas o aplicarlas parcialmente. Este principio de proporcionalidad creemos que debe ser aplicado en Chile. Tal como lo muestra la Figura 38, la normativa actual ya es suficientemente estricta y si se aplica una normativa más estricta, no necesariamente puede haber a un aumento de precio de las estufas nuevas, pero sí va a haber una menor oferta de estufas certificadas.

Informalidad en el mercado de la calefacción por leña

En el estudio “Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana de Santiago”, realizado por la por la Corporación de Desarrollo Tecnológico

el año 2012¹⁰⁵ indica que en la Zona A más San Bernardo y Puente Alto (comunas urbanas) de la Región Metropolitana existían 40.443 estufas a leña. El año 2018, se prohibió el uso de estufas a leña en estas comunas, sin embargo, los resultados de la encuesta Casen del año 2022¹⁰⁶ muestran que aún existen 14.564 estufas a leña y Pellet en esas comunas. Por otro lado, los resultados del estudio CATASTRO DE EMISIONES DE CALEFACTORES Y COCINAS”, LICITACIÓN PÚBLICA N° 611134-16-LE22 realizada por In-Data el año 2022, indica que existen 8.257 estufas a leña y Pellet en las mismas comunas. Esto indica que la “informalidad”, es decir la gente que utiliza estufas a leña sin cumplir con la normativa puede ir desde 20,4 % hasta 36,0 % del total. Esta informalidad puede tener varias consecuencias:

- Aumento de la informalidad en la venta de las estufas.
- Uso por mayor tiempo de estufas antiguas.
- Fabricación y mayor uso de estufas hechizas.

Los puntos anteriores conllevan mayores emisiones, que va a contrarrestar las menores emisiones provenientes de estufas que cumplan una normativa más estricta. Un cálculo simple se describe a continuación:

Aproximadamente, se venden 62.000 estufas a leña nuevas al año en Chile, para renovación o para casas nuevas. Si a estas estufas, se le aplica una nueva norma de emisión más estricta, de por ejemplo 1,6 g/hr, entonces de acuerdo a la Figura 24, un 87% de los calefactores van a quedar fuera de norma. Esto significa que los fabricantes chilenos van a tener que fabricar nuevos calefactores que cumplan la norma o se van a tener que importar calefactores que cumplan la norma. Por ello, se presume que podrían aumentar los precios de venta de los nuevos equipos, esta información es solo especulativa, por parte de las empresas fabricante no se indicó este aspecto al tratarse de secretos empresariales, sin embargo, en base a que existiría una gran cantidad de equipos que no cumplirían con la norma, es de esperar que estos sufran cambios que podrían aumentar los costos.

Debido a un aumento en el precio, es probable que una fracción de estas estufas no se renueve y otra fracción de las estufas antiguas se cambie por estufas hechizas. Haciendo un supuesto conservador de que existe un 20% de informalidad en el mercado de la leña para el escenario 4 (más restrictivo), cerca de un 20% de las estufas podría no renovarse debido al aun mayor precio de venta o reemplazarse por equipos de similares características a las actuales. Es decir, en vez de 62.000 estufas al año nuevas, se venden 49.600 estufas nuevas y 12.400 estufas antiguas seguirían funcionando.

¹⁰⁵https://www.gobiernosantiago.cl/wp-content/uploads/2014/12/Informe_Final_estudio_Lena_CDT_2012_con_anexos.pdf

¹⁰⁶ <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2022>

En la Figura 41, se observan las emisiones del escenario 4, considerando los efectos de la informalidad (se venden menos equipos certificados por un posible aumento de los precios), donde las emisiones para el caso con informalidad son mayores, cerca de un 5% más en el último año de estudio. Este efecto ocurre por equipos de altas emisiones que no son reemplazados por nuevos equipos certificados, que cumplirían con normas más exigentes.

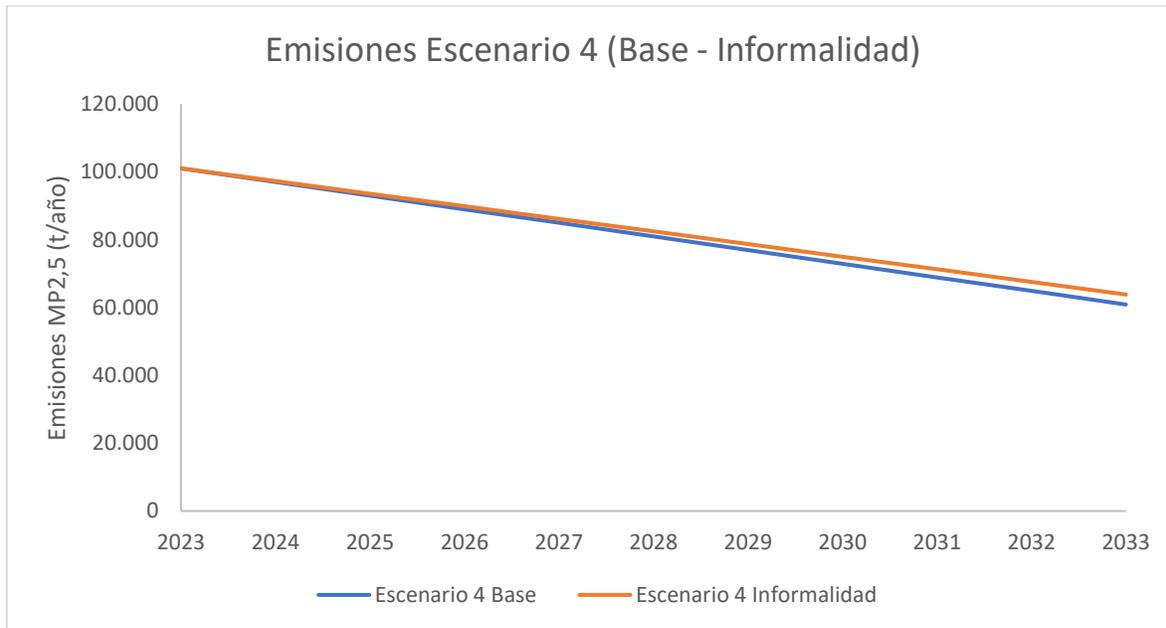


Figura 41, Emisiones para el Escenario 4, con efectos de la informalidad.

11. Evaluación de emisiones y beneficios asociados a las propuestas normativas.

11.1. Estimación de reducción de emisiones por cambios normativos propuestos

Para determinar la reducción en las emisiones de $MP_{2,5}$ dados los cambios normativos propuestos en el capítulo 10.4, se utilizaron los resultados del análisis de los calefactores certificados en los últimos 5 años, con los cuales se estimó una reducción en las emisiones reales proporcional a una reducción en los resultados de laboratorio, por ejemplo, si un calefactor en condiciones de laboratorio tiene una emisión de 2,5 g/h y debe bajar a 2,0 g/h, sus emisiones deben ser un 20% menos, donde se asume esta misma reducción en condiciones reales, la cual se presume conservadora dado que en la realidad esta podría ser mayor. Cabe mencionar que esta reducción solo se realiza a los nuevos calefactores que entran al mercado por año, cerca de 60.000 equipos a leña y 40.000 a pellet.

De esta forma, y dado que existe un porcentaje de equipos que no deben bajar sus emisiones dados los escenarios propuestos, es que se obtienen los siguientes resultados como una reducción promedio ponderada para cada escenario normativo propuesto.

Tabla 40, Reducción de las emisiones de los calefactores nuevos, en base a los escenarios normativos propuestos.

Reducción de las emisiones				
Tipo de calefactor	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Leña	0,19%	4,61%	9,02%	22,88%
Pellet	0,04%	0,04%	0,04%	0,04%

El análisis se realizó proyectando el parque de calefactores a leña y pellet del país, considerando ciertos aspectos. Dados los resultados de la Casen en 2017 y 2022, se observó que la cantidad de viviendas que utilizan biomasa como energía para la calefacción no ha sufrido grandes cambios, de 2.094.024 viviendas en 2017 a 2.053.903 viviendas en 2022. Este dato indica que la cantidad de calefactores se ha mantenido constante en los últimos 5 años. Dadas las tendencias del mercado respecto a la entrada de nuevos equipos para la calefacción como AC y la cantidad de equipos de pellet certificados por años, se realizó una proyección asumiendo un reemplazo natural de equipos viejos y doble cámara por nuevos equipos certificados de leña y pellet. Esta proyección resultó en un cambio de 2.053.903 calefactores en el año base a 1.699.593 calefactores para el año 2033.

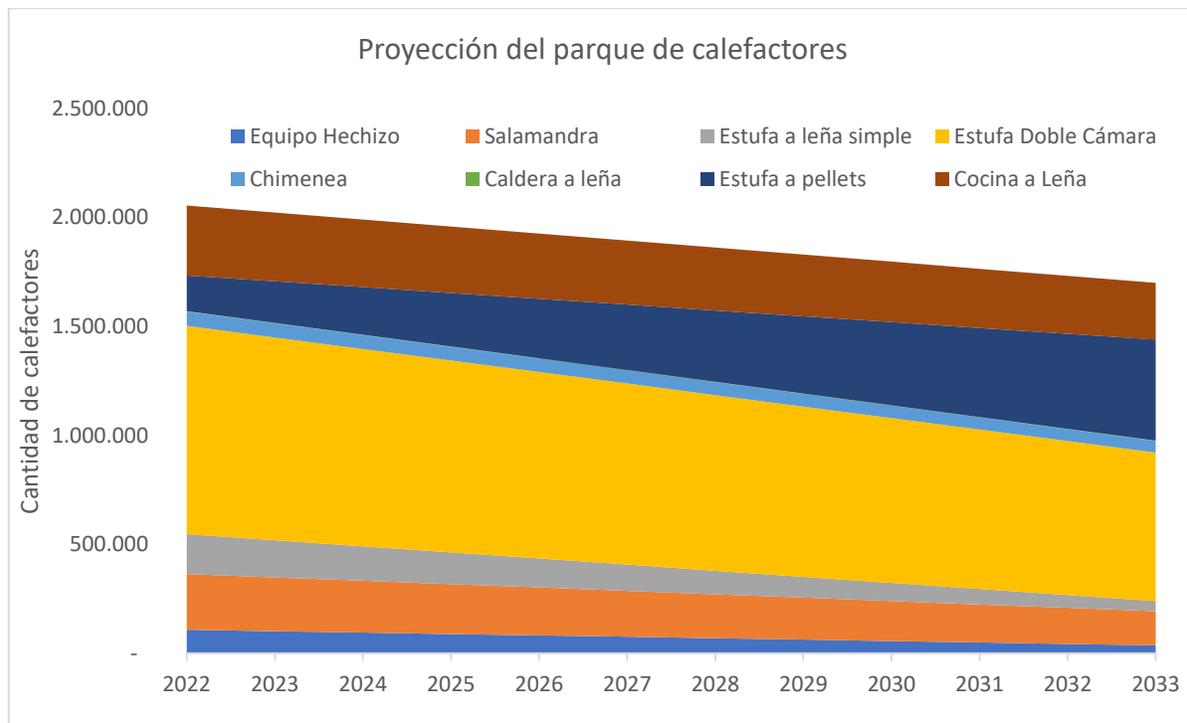


Figura 42, Proyección del parque de calefactores en base a la entrada de nuevos equipos de calefacción. Elaboración propia.

Utilizando la metodología expuesta en el capítulo 9.2.1, se realizó el cálculo de las emisiones siguiendo lo indicado en la ecuación (3), estimando las emisiones de contaminantes para cada uno de los escenarios propuestos. Estos resultados se muestran en la Figura 43, de los cuales se observó una disminución de las emisiones de $MP_{2,5}$, que se produce naturalmente por el recambio de calefactores a leña supuesto, mientras que los efectos de aplicar las medidas de reducción a los nuevos calefactores tienen un efecto menor en la reducción de $MP_{2,5}$. En un escenario restrictivo conservador (escenario 3) solo se logra una disminución del 1,2%.

En el escenario 4, si se restringen las emisiones a 1,6 g/h, sin considerar efectos de la informalidad producida.

Tabla 41, Resultados del cálculo de emisiones de $MP_{2,5}$ en los escenarios normativos.

Escenario normativo	Emisiones de $MP_{2,5}$ acumuladas (t/10años)	Reducción respecto al caso base (t/10años)	Reducción porcentual respecto al caso base
Línea Base	914.477	-	-
Escenario 1	914.169	308	0,03%
Escenario 2	910.712	3.765	0,41%
Escenario 3	904.957	9.520	1,04%
Escenario 4	890.441	24.037	2,63%

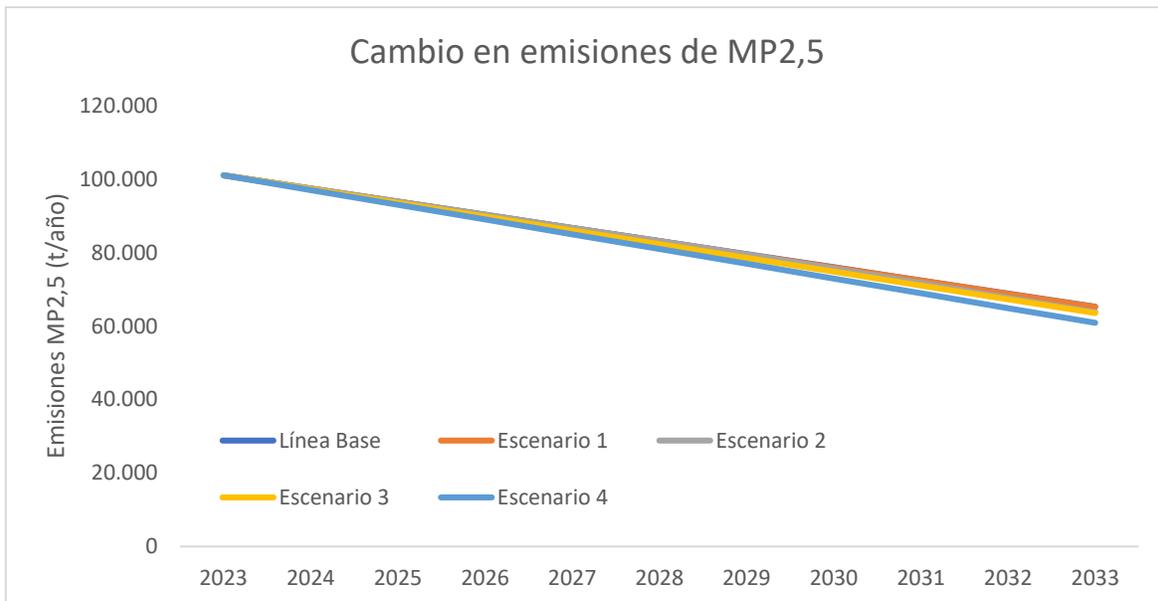


Figura 43, Estimación de las emisiones de $MP_{2,5}$ en base a cambios normativos

Tabla 42, Resumen de los resultados de emisiones de MP_{2,5} por la aplicación de escenarios normativos.

Emisiones de MP _{2,5} (t/año)											
Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Línea Base	101.011	97.435	93.860	90.285	86.710	83.134	79.559	75.984	72.409	68.833	65.258
Escenario 1	101.011	97.430	93.849	90.268	86.687	83.106	79.525	75.945	72.364	68.783	65.202
Escenario 2	101.014	97.433	93.852	90.271	86.691	83.110	79.529	75.608	71.668	67.733	63.803
Escenario 3	101.014	97.265	93.516	89.767	86.018	82.269	78.520	74.771	71.022	67.273	63.523
Escenario 4	101.014	97.001	92.988	88.975	84.962	80.949	76.936	72.923	68.910	64.897	60.884

Otro efecto que es de interés contemplar, son los efectos alternos que pueden tener los cambios normativos. Por ejemplo, se presume que un cambio en la normativa producirá un aumento en los costos de los equipos a leña que se certifican, lo que podría producir un aumento en la cantidad de equipos “hechizos” que se comercializan informalmente, no existen antecedentes que den cuenta de esta situación, si consideramos el valor indicado en el punto 10.4.1, el valor de la informalidad puede variar entre un 20% y un 30% aproximadamente. Por tanto, para ser conservadores, en el supuesto un aumento en los costos de los equipos se presume que un 10% de los calefactores comercializados por años se dejan de vender, o disminuye en esta cantidad la oferta de equipos, lo que genera que exista una cantidad cercana a 6.200 unidades de estufas que no serán recambiadas por nuevos equipos certificados, adquiriendo equipos con mayores emisiones, esto para el Escenario 3 y un 20% para el caso del Escenario 4 (cerca de 12.400 equipos).

Bajo estos supuestos, los resultados de las emisiones acumuladas a 10 años para los mismos escenarios de normas, con efectos de informalidad se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43, Resultados del cálculo de emisiones de MP_{2,5} en los escenarios normativos con efectos de informalidad.

Escenario normativo	Emisiones de MP _{2,5} acumuladas	Reducción respecto al caso base	Reducción porcentual respecto al caso base
Línea Base	914.477	-	-
Escenario 1	914.169	308	0,03%
Escenario 2	910.712	3.765	0,41%
Escenario 3	911.622	2.856	0,31%
Escenario 4	906.672	7.805	0,85%

Esto indica que un posible aumento en los precios de los calefactores certificados que conlleven a una menor venta de equipos tendría un efecto en las emisiones, disminuyendo lo que se podría lograr con la aplicación de una nueva norma.

11.2. Estimación del cambio de concentración atmosférica de MP_{2,5} por cambios normativos propuestos

Para estimar el cambio en las concentraciones atmosféricas es necesario calcular el factor emisión-concentración de los contaminantes atmosféricos producto de la calefacción a leña y pellet, siguiendo la Ecuación (1). El cálculo de las emisiones fue el realizado en el punto 11.1, mientras que el cálculo de las concentraciones atmosféricas fue realizado en el 0. Esto fue realizado para cada uno de los escenarios normativos propuestos, determinando el factor FEC para el año base de cada escenario.

En consecuencia, se realizó el cálculo de los cambios en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} siguiendo la metodología de “Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire” MMA, 2012¹⁰⁷, donde la fórmula para determinar esta diferencia es:

$$\Delta C_{MP_{2,5}}^t = \sum_i \frac{\Delta E_i^t}{FEC_i^t}$$

Donde:

- $\Delta C_{MP_{2,5}}^t$ es el cambio en la concentración de MP_{2,5} para un año de estudio t , medido en ($\mu\text{gMP}_{2,5}/\text{m}^3$).
- ΔE_i^t es el cambio en las emisiones del contaminante primario i (MP_{2,5}, SO_x, NO_x, NH₃) en el año de estudio t , medidas en (t/año).
- FEC_i^t es la relación entre la emisión y la concentración atmosférica del contaminante primario i (MP_{2,5}, SO_x, NO_x, NH₃) en el año de estudio t , medidas en (t/año)/ ($\mu\text{gMP}_{2,5}/\text{m}^3$).

Este cálculo dio como resultado el cambio en las concentraciones de MP_{2,5} para cada uno de los escenarios normativos propuestos respecto a la línea base, sin considerar el efecto del cambio natural de los calefactores, estos fueron determinados para cada comuna del país, considerando las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} y las emisiones totales dadas el inventario de emisiones 2023, donde el cambio en las emisiones está dado por las propuestas normativas.

Se debe hacer notar que en la “Guía Metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire” MMA, 2012¹⁰⁸ se dice que el método correcto para estimar las concentraciones a partir de las emisiones es utilizar un modelo de dispersión que considere la topografía, vientos,

¹⁰⁷ https://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-54447_Guia_MetodologicaCalidadAire25072013.pdf

¹⁰⁸ https://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-54447_Guia_MetodologicaCalidadAire25072013.pdf

emisiones y condiciones meteorológicas. Pero al ser muy complicado, se propone utilizar un método tipo *roll-back* con el que se obtienen las ecuaciones indicadas anteriormente. Sin embargo, la Guía no hace una estimación de los errores en las concentraciones obtenidos con el método *roll-back*, por ello, la incerteza puede ser muy grandes.

11.3. Estimación del costo en el cambio de la metodología de ensayo para determinar las emisiones de MP_{2,5}.

Para estimar los costos asociados a una modificación de la metodología de ensayo en base al nuevo protocolo IDC aprobado por la EPA, se revisó el detalle de este, donde se identificaron tres factores clave a la hora de cuantificar los costos:

- Adquisición de equipamiento.
- Horas laborales asociadas.

El método IDC establece como equipamiento un analizador de material particulado en tiempo real especificando el modelo “Thermo Scientific TEOM serie 1405”. Al respecto, se realizaron las consultas a Cesmec, que en la actualidad es el único laboratorio que cuenta con certificación del INN para realizar los ensayos a estufas a leña y pellet. Ellos indicaron que no posee este tipo de equipamiento, lo que implicaría que, en caso de adoptar esta característica a un nuevo protocolo, este laboratorio debería incurrir en la inversión de este equipo, el cual, en base a “Newcastle Local Air Quality Monitoring Network, NSW ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY, Review of Cost Effectiveness”¹⁰⁹, donde se realiza una evaluación de implementar este tipo de tecnologías, se indicó que el precio de este tipo de equipos puede ser mayor a **39.000 USD**.

Respecto a las horas laborales del personal encargado de la ejecución del ensayo, el método IDC establece que cada una de las cuatro etapas de quemado probadas debe ser realizada en tres ocasiones, lo que supone la ejecución de 12 corridas en total. En el estudio “Development of an integrated duty cycle test method to assess cordwood stove performance”¹¹⁰ se indica que la ejecución de las cuatro etapas de quemado del método puede ser realizada en 10 horas (posibles en un día de trabajo con los turnos adecuados), por tanto, la aplicación del total de ensayos tiene un tiempo aproximado de ejecución de tres días. Esto no es alejado de los tiempos actuales de ejecución, ya que, en base a las entrevistas realizadas a la jefatura de laboratorios de Cesmec, se indicó que en la actualidad, con el método CH-28, los tiempos para completar las pruebas de un calefactor rondan entre 4 y 5 días (considerando las mediciones de eficiencia, las cuales duran en promedio un día).

¹⁰⁹ <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/air/NLAQMNCostRev.pdf>

¹¹⁰ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2022.2057615>

Además, dado que la medición debe realizarse continuamente con supervisión, Cesmec trabaja con turnos para lograr realizar la medición sin interrupción. Por tanto, en lo que respecta a las horas laborales, no se aprecia un impacto por el cambio del protocolo de medición.

11.4. Identificar y valorizar los beneficios en salud (mortalidad y morbilidad) por los escenarios normativos propuestos.

El material particulado $MP_{2,5}$, también llamado *material particulado fino*, corresponde a partículas en suspensión en el ambiente que poseen un diámetro de 2,5 micrómetros o menos. Las dimensiones del $MP_{2,5}$ son lo suficientemente pequeñas como para ser inhalado fácilmente, permitiendo su penetración sin obstáculos en los pulmones. Se han investigado los impactos en la salud asociados a dicho material, revelándose efectos perjudiciales tanto a corto como a largo plazo tras la exposición. Las fuentes de material particulado $MP_{2,5}$ relacionadas con la calefacción incluyen la combustión de combustibles fósiles y de biomasa.

11.4.1. Identificación de los beneficios

Se ha demostrado que la exposición al material particulado $MP_{2,5}$ está asociado a problemas en la salud, en donde se destacan los problemas respiratorios y cardiovasculares. Estas afecciones a la salud se presentan ante exposiciones en un corto como en un largo periodo de tiempo. Se estima que en Chile la exposición a este tipo de material particulado es responsable de alrededor de 3.000 hospitalizaciones al año y cerca de 4.500 muertes (Huneus et al., 2020).

Los principales efectos por exposición a $MP_{2,5}$ son aquellos asociados directamente a la salud así como también efectos derivados, como las visitas a salas de emergencia y pérdida de productividad debido a restricciones de actividad.



Figura 44. Principales efectos debido a la exposición a material particulado $MP_{2,5}$.

Los efectos en salud por exposición a $MP_{2,5}$ pueden ser estudiados bajo una mirada a corto o a largo plazo. Ante ambos tipos de exposición se ha demostrado una relación causal entre la respiración de material particulado y los casos de morbilidad respiratoria, cardiovascular y de mortalidad. Por otro lado, en las exposiciones a largo plazo, han sido estudiadas otras afecciones a la salud, como problemas reproductivos además de cáncer, mutagenicidad y genotoxicidad, sin embargo, las conclusiones sólo ofrecen una relación sugerente entre estas afecciones médicas y la exposición prolongada a $MP_{2,5}$ [EPA (2009). Integrated Science Assessment for Particulate Matter: Final Report. Research Triangle Park, NC, US Government].

Según un estudio publicado por la EPA (*Environmental Protection Agency*) publicado el año 2009, es posible hacer una relación causal entre el $MP_{2,5}$ y la mortalidad a corto plazo según las concentraciones de $MP_{2,5}$ a ese año en Estados Unidos. Este dice que por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$ el riesgo incrementa entre un 0,29% a 1,21%. Por otro lado, el incremento en el riesgo de morbilidad cardiovascular es de entre un 0,4% y un 3,4% por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de incremento en la concentración de $MP_{2,5}$. Por otro lado, un estudio del Departamento de Economía Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente¹¹¹ presenta un coeficiente de riesgo unitario de mortalidad a largo plazo de 0,86%, el cual se encuentra dentro del rango presentado por el estudio de la EPA.

Aunque la EPA (2009) establece una relación causal entre la exposición al $MP_{2,5}$ y la mortalidad a corto plazo, un estudio adicional llevado a cabo por la USEPA mediante investigaciones epidemiológicas a largo plazo ha confirmado una relación causal entre la exposición a $MP_{2,5}$ y defunciones a lo largo de un periodo extenso. En consecuencia, en la metodología de valorización de los casos de mortalidad se tienen en cuenta principalmente los efectos a largo plazo.

Con relación a la incidencia de enfermedades respiratorias, un estudio¹¹² señala que un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de $MP_{2,5}$ se asoció con un incremento de aproximadamente el 2% en las hospitalizaciones por problemas respiratorios observado entre 1 y 2 días después de la exposición. Además, este porcentaje se elevó al 5% del total de las hospitalizaciones relacionadas con enfermedades respiratorias en niños cuando la exposición ocurrió con un rezago de 8 días. Si bien las causas que lleven a hospitalizaciones por afecciones respiratorias pueden ser variadas, el estudio considera la presencia del virus

¹¹¹ Gallardo C., Schulz P., Trivelli N., Briceño S. & Pizarro R. (2017). Análisis General Del Impacto Económico Y Social Del Anteproyecto De Revisión De Norma Primaria De Calidad Del Aire Para Material Particulado Respirable MP_{10} . Departamento De Economía Ambiental – Ministerio Del Medio Ambiente.

¹¹² Matus C., Patricia, & Oyarzún G., Manuel. (2019). Impacto del Material Particulado aéreo ($MP_{2,5}$) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en niños: estudio caso-control alterno. *Revista chilena de pediatría*, 90(2), 166-174. <https://dx.doi.org/10.32641/rchped.v90i2.750>

sincial respiratorio (VRS), encontrando una sinergia entre la exposición a material particulado y el virus presente en el medioambiente.

Las admisiones hospitalarias se refieren a la hospitalización de pacientes debido a enfermedades o condiciones de deterioro a la salud, así como también a procedimientos médicos programados con anterioridad. Las afecciones a la salud consideradas para el próximo cálculo de valorización de los beneficios, y que ha sido demostrada su relación causal entre dicha enfermedad y la exposición a MP_{2.5} y existe información suficiente para determinar su valorización monetaria, son:

- Asma
- Enfermedades cardiovasculares
- Enfermedades respiratorias crónicas
- Neumonía

Además, es incluida la valorización en casos de asma en el que se realizan visitas a salas de emergencia.

Finalmente, es considerada como relevante la productividad perdida como consecuencia de los distintos efectos en la salud por material particulado, o también por las posibles restricciones de actividad. Se considera por lo tanto la productividad perdida en:

- Días laborales
- Días de actividad restringida
- Días de actividad restringida menor

11.5. Valoración económica de la disminución de emisiones

La metodología utilizada para elaborar la valoración de los beneficios se realiza en base a funciones de Concentración-Respuesta (C-R), las que establecen una relación entre la incidencia de determinados efectos a la salud y niveles de concentración de contaminantes en el ambiente a través de un coeficiente de riesgo unitario. Esta metodología es la utilizada en los Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES). Para determinar el valor total de los efectos, en primer lugar, se debe conocer la cantidad de casos asociados a cada uno de dichos efectos para luego a estos aplicarles el valor determinado según corresponda.

La cantidad de casos para cada beneficio es determinada a través de los siguientes factores:

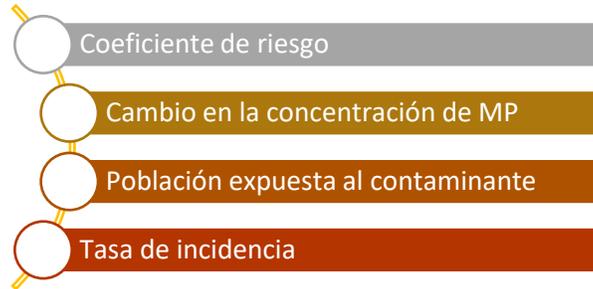


Figura 45. Factores utilizados para determinar cambios en el número de efectos por exposición a MP_{2,5}.

Así, el número de efectos se determina mediante la siguiente relación:

$$\Delta\text{Efecto}_{pj} \approx \sum_{i=1}^n \beta_{pj} \cdot \Delta C_{pi} \cdot P_{ijp} \cdot y_{0j}$$

Donde,

ΔEfecto_{pj} : Cambio en efecto en salud j debido al delta de concentración del contaminante p [$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$]

β_{pj} : Coeficiente de riesgo unitario del efecto en salud j y contaminante p [$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$]

ΔC_{pi} : Cambio en concentración de contaminante p en ubicación i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

P_{ijp} : Población i expuesta al contaminante p que puede sufrir efecto en salud j [habitantes]

y_{0j} : Tasa de incidencia base [casos / (habitantes- año)]

Por otro lado, el beneficio se determina como el la cantidad de casos de cada uno de los beneficios por un cambio en la concentración ambiental de material particulado multiplicado por la valoración unitaria asociada a cada efecto:

$$\text{Beneficio}_p = \sum_j \Delta\text{Efecto}_{pj} \cdot \text{VU}_j$$

Donde,

Beneficio_p : Beneficio de la reducción de la concentración ambiental de p , en este caso MP_{2,5}

VU_j : Valoración unitaria de cada efecto j evaluado [UF/caso]

11.5.1. Valores de los coeficientes de riesgo unitario

Tabla 44. Coeficientes de riesgo unitario para MP_{2.5}¹¹³

		Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0,00%	0,93%	0,93%	0,93%
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	0,33%	0,33%	0,33%	0,00%
	<i>Cardiovascular</i>	0,00%	0,15%	0,15%	0,16%
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,00%	0,24%	0,24%	0,12%
	<i>Neumonía</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,40%
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	0,44%	0,00%	0,00%	0,00%
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,00%	0,46%	0,46%	0,00%
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,00%	0,48%	0,48%	0,00%
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,00%	0,74%	0,74%	0,00%

11.5.2. Valores de Tasas De Incidencia Base

Los valores de Tasas De Incidencia Base son obtenidos de Actualización De Tasas De Incidencia Base De Mortalidad Y Morbilidad Para Contaminación Atmosférica Y Creación De Un Modelo Automático Para La Actualización¹¹⁴. Este estudio presenta las tasas segregadas por grupos etarios que abarcan generalmente 5 años. Para adaptar esta información a los grupos etarios trabajados en este informe se realizó un promedio de las tasas. Así, la tasa del grupo etario “Niños” corresponde al promedio de las tasas de los grupos [0,1], [1,4], [5,9], [10,14], [15,19] presentados por el estudio de DICTUC (2020). El mismo procedimiento se realizó para los grupos etarios “Adultos 18-29”, “Adultos 30-64” y “Adultos Mayores”.

Dicho estudio, para el caso de morbilidad, presenta tasas de morbilidad respiratoria de forma general. Por lo tanto, para afecciones específicas tales como asma, neumonía y enfermedades respiratorias crónicas se utilizan las mismas tasas.

¹¹³ ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL ANTEPROYECTO DE LA REVISIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS. 2021. <https://consultaciudadanas.mma.gob.cl/storage/records/Rah5ICHX5T7KZhhWKA8vsZPzAJ32aJ2u2CTvsYIxdf>

¹¹⁴ <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8484a611-8fa9-4695-acea-c847e7b828c0&fname=200221-ATICA2-InformeFinal.pdf&access=public>

En cuanto a las tasas por productividad perdida por morbilidad y vista a salas de emergencia, se asumen como cero para los días de actividad restringida puesto que, en general, las actividades laborales no son suspendidas o limitadas salvo en ocasiones o profesiones puntuales. En cuanto a días laborales perdidos, se asumen como cero tanto para niños y adultos mayores, por no considerarse dentro del mercado laboral activo. Para adultos, esta tasa corresponde a la suma de las tasas de admisiones hospitalarias y visitas a salas de emergencia, debido a que la asistencia a un hospital o sala de emergencia por enfermedad implica una ausencia laboral.

Finalmente, estas tasas de incidencia son por cada 1.000 habitantes. Esto quiere decir que para elaborar los cálculos para la población nacional, estos deben ser modificados de forma tal que contemplen el total de personas en cada uno de los grupos etarios.

Tabla 45. Tasas de mortalidad, morbilidad [eventos/1.000 habitantes]. Detalle Nacional. Fuente: DICTUC (2020).

Tipo de efecto		Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	1,59	0,66	3,33	40,25
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	26,56	2,72	3,57	24,44
	<i>Cardiovascular</i>	0,53	0,98	7,28	37,57
	<i>Respiratorias crónicas</i>	26,56	2,72	3,57	24,44
	<i>Neumonía</i>	26,56	2,72	3,57	24,44
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	26,56	2,72	3,57	24,44
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,00	12,52	24,88	0,00
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,00	0,00	0,00	0,00

11.5.3. Población expuesta

A partir de la proyecciones de población realizada por el INE en base a los resultados del censo 2017, se determinó la población expuesta para cada comuna del país, estos datos se dividieron según el segmento de población en que se realiza en análisis (Niños, Adultos 18-29, Adultos, 30-64, Adultos Mayores).

11.5.4. Valores unitarios de beneficios

Los valores unitarios de cada efecto son obtenidos de “ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL ANTEPROYECTO DE LA REVISIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS. 2021”, 2021.

Tabla 46. Valoración unitaria de cada efecto evaluado [UF/caso]¹¹⁵.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	12.897,0	12.897,0	12.897,0	12.897,0
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	22,0	24,0	24,0	0,0
	<i>Cardiovascular</i>	0,0	49,0	49,0	49,0
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,0	31,0	31,0	32,0
	<i>Neumonía</i>	0,0	0,0	0,0	34,0
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	1,1	0,0	0,0	0,0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,0	0,7	0,7	0,0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,0	0,2	0,2	0,0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,0	0,0	0,0	0,0

11.5.5. Resultados de la estimación de costos y beneficios asociados a los cambios normativos propuesto.

Según los resultados de la disminución de las emisiones para los escenarios propuestos, se determinó el cambio en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} para cada comuna del país. En base a esto, se realizó cálculo de los casos disminuidos por efecto de estos cambios y la valorización económica de los mismos. Cabe mencionar que cada resultado corresponde al valor sumado de todas las comunas del país, donde, el en la zona norte los efectos a la salud y la valorización son menores en comparación a la zona centro y sur, dado que se cuantifica en función de los cambios en las concentraciones atmosféricas

¹¹⁵ ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL ANTEPROYECTO DE LA REVISIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS. 2021. <https://consultaciudadanas.mma.gob.cl/storage/records/Rah5ICHX5T7KZhhWKA8vsZPzAJ32aJ2u2CTvsYIx.pdf>

particulares, donde en zona norte, los cambios son considerablemente menores en comparación, por una menor cantidad de calefactores y uso de leña y pellet.

● *Resultados Escenario 1*

La disminución de los casos por efecto de aplicar la medida del Escenario 1 se indican en la Tabla 47.

Tabla 47. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP_{2,5} para el Escenario 1.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0,0	0,1	1,3	4,6
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	2,0	0,1	0,5	0,0
	<i>Cardiovascular</i>	0,0	0,0	0,5	0,7
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,0	0,1	0,4	0,4
	<i>Neumonía</i>	0,0	0,0	0,0	1,2
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	2,7	0,0	0,0	0,0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,0	0,7	4,2	0,0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,0	0,0	0,0	0,0

La valorización económica por efectos de la reducción en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} para el Escenario 1 de análisis se indica en la Tabla 48.

Tabla 48. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP_{2,5} del Escenario 1 (Valores en UF).

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0	996	16.755	59.646	77.397
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	44	3	12	0	58
	<i>Cardiovascular</i>	0	1	22	36	60
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0	3	11	12	25
	<i>Neumonía</i>	0	0	0	41	41
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	3	0	0	0	3
	<i>Días laborales</i>	0	0	3	0	3

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
Productividad perdida	<i>Días de actividad restringida</i>	0	0	0	0	0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0	0	0	0	0
TOTAL		47	1.002	16.803	59.735	77.588

● *Resultados escenario 2*

La disminución de los casos por efecto de aplicar la medida del Escenario 1 se indican en la Tabla 49

Tabla 49. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP_{2,5} para el Escenario 2.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18- 29	Adultos 30- 64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0,0	1,9	33,1	118,2
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	50,7	2,8	12,6	0,0
	<i>Cardiovascular</i>	0,0	0,5	11,7	19,0
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,0	2,0	9,1	9,3
	<i>Neumonía</i>	0,0	0,0	0,0	30,9
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	67,6	0,0	0,0	0,0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,0	17,1	105,9	0,0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,0	0,0	0,0	0,0

La valorización económica por efectos de la reducción en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} para el Escenario 1 de análisis se indica en la Tabla 50.

Tabla 50. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP_{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0	24.837	426.738	1.523.851	1.975.426
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	1.116	68	302	0	1.486
	<i>Cardiovascular</i>	0	23	572	930	1.524

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0	63	284	296	643
	<i>Neumonía</i>	0	0	0	1.049	1.049
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	74	0	0	0	74
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0	12	74	0	86
	<i>Días de actividad restringida</i>	0	0	0	0	0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0	0	0	0	0
TOTAL		1.191	25.003	427.970	1.526.126	1.980.289

● *Resultados escenario 3*

La disminución de los casos por efecto de aplicar la medida del Escenario 1 se indican en la Tabla 51.

Tabla 51. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP_{2,5} para el Escenario 2.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18- 29	Adultos 30- 64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0,0	2,3	39,4	140,8
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	60,5	3,4	15,0	0,0
	<i>Cardiovascular</i>	0,0	0,5	13,9	22,6
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,0	2,4	10,9	11,0
	<i>Neumonía</i>	0,0	0,0	0,0	36,8
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	80,6	0,0	0,0	0,0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,0	20,4	126,2	0,0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,0	0,0	0,0	0,0

La valorización económica por efectos de la reducción en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} para el Escenario 1 de análisis se indica en la Tabla 52.

Tabla 52. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP_{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0	29.594	508.542	1.816.003	2.354.140
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	1.330	81	360	0	1.770
	<i>Cardiovascular</i>	0	27	682	1.108	1.816
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0	76	338	353	767
	<i>Neumonía</i>	0	0	0	1.250	1.250
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	89	0	0	0	89
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0	14	88	0	103
	<i>Días de actividad restringida</i>	0	0	0	0	0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0	0	0	0	0
TOTAL		1.419	29.792	510.010	1.818.715	2.359.935

● *Resultados escenario 4*

La disminución de los casos por efecto de aplicar la medida del Escenario 1 se indican en la Tabla 53 Tabla 51.

Tabla 53. Disminución de casos en efectos en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP_{2,5} para el Escenario 2.

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0,0	5,8	99,4	354,9
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	152,4	8,5	37,8	0,0
	<i>Cardiovascular</i>	0,0	1,4	35,1	57,0
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0,0	6,1	27,5	27,8
	<i>Neumonía</i>	0,0	0,0	0,0	92,7
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	203,2	0,0	0,0	0,0
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0,0	51,4	318,2	0,0
	<i>Días de actividad restringida</i>	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0,0	0,0	0,0	0,0

La valorización económica por efectos de la reducción en las concentraciones atmosféricas de MP_{2,5} para el Escenario 1 de análisis se indica en la Tabla 54.

Tabla 54. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP_{2,5} del Escenario 2 (Valores en UF).

Tipo de efecto	Efecto detalle	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos Mayores	Total (UF)
Mortalidad	<i>Largo Plazo</i>	0	74.562	1.281.805	4.577.611	5.933.978
Admisiones hospitalarias	<i>Asma</i>	3.352	203	907	0	4.462
	<i>Cardiovascular</i>	0	68	1.718	2.793	4.578
	<i>Respiratorias crónicas</i>	0	191	852	890	1.932
	<i>Neumonía</i>	0	0	0	3.152	3.152
Visitas Salas de Emergencia	<i>Asma</i>	223	0	0	0	223
Productividad perdida	<i>Días laborales</i>	0	36	223	0	259
	<i>Días de actividad restringida</i>	0	0	0	0	0
	<i>Días de actividad restringida menor</i>	0	0	0	0	0
TOTAL		3.576	75.059	1.285.504	4.584.446	5.948.585

- *Resumen*

El resumen de la disminución en la cantidad de casos, así como los valores obtenidos como consecuencia de la disminución de la concentración de MP_{2,5}, se muestran a continuación.

Tabla 55. Disminución de casos en efectos totales en salud debido a la disminución de concentración del contaminante MP_{2,5} en los tres casos propuestos.

Tipo de efecto	Total Escenario 1	Total Escenario 2	Total Escenario 3	Total Escenario 4
Mortalidad	6,0	153,2	182,5	460,1
Admisiones hospitalarias	2,6	66,1	78,8	198,6
	1,2	31,1	37,1	93,4
	0,8	20,5	24,4	61,4
	1,2	30,9	36,8	92,7
Visitas Salas de Emergencia	2,7	67,6	80,6	203,2
Productividad perdida	4,8	123,0	146,6	369,5
	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 56. Valorización por la reducción de la concentración ambiental de MP_{2,5} en los cuatro escenarios propuestos. (Valores en UF).

Tipo de efecto	Total Escenario 1	Total Escenario 2	Total Escenario 3	Total Escenario 4
Mortalidad	77.397	1.975.426	2.354.140	5.933.978
Admisiones hospitalarias	58	1.486	1.770	4.462
	60	1.524	1.816	4.578
	25	643	767	1.932
	41	1.049	1.250	3.152
Visitas Salas de Emergencia	3	74	89	223
Productividad perdida	3	86	103	259
	0	0	0	0
	0	0	0	0
Total	77.588	1.980.289	2.359.935	5.948.585

De estos resultados se observa que la cantidad de casos disminuidos es relativamente bajo, en general los escenarios normativos propuestos, consideran cambios tecnológicos de los nuevos calefactores certificados que entrarían al mercado por año, por lo que la disminución viene dada por un fracción menor del total, además, dentro de estos nuevos calefactores, se considera que una parte no debe disminuir sus emisiones, ya que estos cumplen con la mayoría de escenarios propuestos, a excepción del Escenario 4, donde prácticamente todos los calefactores del mercado deben disminuir sus emisiones.

Respecto a la valorización, como es de esperar, la mayor contribución está dada por el cálculo de la mortalidad evitada, dimensión que tiene una mayor valorización.

11.6. Costos asociados a la actualización de la norma

Dentro del análisis del AGIES es requerida la identificación de los costos asociados a la implementación de medidas para la reducción de emisiones y/o concentraciones atmosféricas. Bajo esto se realizó en primera instancia la identificación de que aspectos se vería afectados y si tienen costos asociados.

- Certificación de nuevos calefactores: Actualmente en Chile, la certificación de nuevos calefactores tiene validez de un año desde la fecha de emisión, situación que, con una eventual actualización de los límites de emisión permitidos para los calefactores a leña y pellet, no tendría un cambio, solo se deben verificar los nuevos límites establecidos por la autoridad. En este contexto, por efectos de cambiar los límites de emisión de los calefactores, no se conllevaría en un costo en torno a la certificación de nuevos equipos.
- Fiscalización de la norma: En el presente estudio, en los escenarios propuestos de normas, solo se establecen cambios en los límites de emisión permitidos para los

calefactores, la fiscalización está dada por el proceso de certificación en sí mismo, ya que en este es donde se verifica que los artefactos que se pueden comercializar cumplan con los nuevos límites propuestos. Por tanto, no existen costos asociados a la fiscalización de la aplicación en función de la actualización de la norma.

- Costos de inversión del estado: En este aspecto, a diferencia de otros análisis de AGIES donde se deben realizar acciones por parte del estado para lograr la disminución de las concentraciones atmosféricas por medio de programas de recambio, reacondicionamientos térmicos, entre otros, los cuales incurren en costos de inversión, en el presente estudio se realizó la estimación de los cambios en las concentraciones atmosféricas por efectos de aplicar límites más restrictivos para los calefactores, lo que no implica en inversiones para su aplicación. De esta forma, no se consideran costos de inversión del estado por la actualización de la norma de estudio.
- Costos de inversión de los privados: En este aspecto, se realizó una investigación de los precios de mercado de los calefactores certificados actualmente comercializados, donde no se observó un aumento en el precio de los equipos con menores emisiones, el precio solo se ve afectado por la potencia del artefacto. Con la aplicación de nuevos límites de emisión, parte de los de calefactores que se certifican actualmente, no cumplirían con estos estándares, en cada Escenario propuesto la cantidad de equipos que cumple con las normas propuestas es distinta, lo que puede derivar en dos situaciones previstas:
 - Cambios en a los equipos actuales: Dado que algunos modelos no cumplirían con los nuevos límites establecidos, las empresas podrían realizar cambios a los modelos con tal de lograr los requerimientos para su venta, esto se podría lograr mediante cambios tecnológicos o de diseño, los cuales son inciertos, dado que esta información corresponde a secretos empresariales que no fueron compartidos, además de que dependerán de las necesidades propias de los fabricantes. Esto significa que no es posible cuantificar la inversión requerida por los fabricantes para lograr actualizar los modelos que no cumplirían con los nuevos límites de emisión.
 - Producción de equipos que cumplen: Dados los cambios propuestos de los límites de emisión, existen modelos de calefactores a leña que cumplirían con estos, lo que podría provocar que solo se fabricaran estos modelos para no incurrir en inversiones o cambios a los equipos que no cumplían con las normas. De esta forma, en base a este supuesto, no existirían costos asociados por efectos de aplicar cambios en los límites de emisión.

En general, se plantean los parámetros que pueden estar afectados de incurrir en costos dada la implementación de nuevos límites para los calefactores a leña y pellet. En la mayoría de los casos, no se detectan costos asociados a esta, salvo en el caso de que sea necesario

actualizar los modelos que no cumplirían con las propuestas, en este aspecto, se puede presumir un aumento en los precios de venta por efectos de la inversión que deben realizar los fabricantes bajo estos supuestos. Sin embargo, esto es mayormente especulativo, no se ha observado una relación en mayores costos de equipos por menores emisiones

12. Conclusiones

12.1. Etapa 1

Las normas que regulan las emisiones de MP en los países extranjeros, han sido modificadas con el paso de los años, ajustándose cada vez más a mayores exigencias en pro de disminuir los niveles de contaminación. En la actualidad, se ha visto una actualización de los límites establecidos tanto por la EPA en 2020 y por la EU (en el programa Ecodesign) en 2022, las cuales buscan la disminución de las emisiones de los calefactores que se comercializan dentro de sus territorios.

En Estados Unidos, se estableció un límite exigente en un plazo de 5 años, donde se dio tiempo a los fabricantes para vender el stock actual de artefactos y para rediseñar los modelos de estufas con tal de cumplir con las nuevas exigencias. Este aspecto también fue implementado en la Unión Europea, donde se estableció un margen de tiempo para la implementación de los nuevos límites de emisión. Por tanto, es de importancia considerar en un posible cambio de los límites de emisión en Chile, la existencia de un plazo de aplicabilidad, tanto para los proveedores como para las entidades certificadoras, ya que un cambio en las normas o protocolos, implican en renovación de permisos con el INN, provocando que durante el tiempo que no exista autorización y no se pueda realizar la certificación de los calefactores.

Respecto a la situación de Chile, la norma nacional es de similares características a la norma de la EPA, pero haciendo la diferencia entre equipos de potencias térmicas distintas, caso que no ocurre actualmente en la EPA. Dado esto, la norma chilena es en la actualidad más flexible para equipos de potencias altas que para equipos de potencias bajas. La no diferenciación realizada por la EPA respecto a la potencia térmica de los equipos permite que no queden fuera de norma algunos equipos, caso que ocurre en Chile con los equipos a leña y pellet de potencias por sobre los 25 kW, sin embargo, la magnitud del mercado de estos artefactos es marginal comparada al de otros rangos de potencia.

Se han visto actualizaciones en los protocolos de medición para estufas tanto a leña como pellet, donde se busca realizar las medidas lo más cercano a la realidad residencial. Estas nuevas propuestas han ido de la mano con estudios que caracterizaron los patrones de usos de las estufas que son significativos en una muestra y el tipo de combustible que se

suministra. De esta forma, existe un camino que busca cuantificar las emisiones de los calefactores en base a situaciones reales de operación y del energético.

En la actualidad, la EPA aprobó el protocolo para la cuantificación de las emisiones de MP, en base al método IDC descrito en el documento ALT-140. Este da los lineamientos para el suministro de leña en estufas, estableciendo 4 fases de quemado que representen las condiciones de calefacción de un hogar, cómo el inicio en frío del calefactor, etapa de fuego alto, etapa de mantención de la temperatura y etapa de larga duración de la calefacción con baja tasa de quemado. En la actualidad, no se ha normado al respecto de este método, aún falta mayor investigación y determinación de los límites que deben ser establecidos para las emisión con este protocolo.

En otros países, las medidas implementadas para la reducción de la emisiones procedentes de estufas a combustión de leña y sus derivados, se han decantado hacia la certificación de los energéticos utilizados, sean leña o pellet, ya que un buen energético base produce menores emisiones. Además, se han implementado programas de recambio al igual que en Chile, con el objetivo de eliminar del parque, los calefactores de altas emisiones, por artefactos modernos con certificación. Estas experiencias han mostrado grandes dificultades en su implementación, ya que las metas establecidas no siempre son cumplidas en los tiempos indicados. Sin embargo, se presentan como una de las formas más directas de acelerar el cambio tecnológico de los calefactores.

12.1. Etapa 2

El mercado de calefactores de combustibles sólidos dentro del país cuenta con una variedad de equipos, tanto nuevos certificados como no certificados, que no necesariamente cuentan con estándares de emisiones. De esta forma se ha buscado desde la normativa, la obligatoriedad de certificar los calefactores.

En general se habla de un máximo aproximado de 60.000 calefactores a leña y 40.000 calefactores a pellet, que son comercializados al año, de un parque de viviendas que utilizan equipos de combustibles sólidos de aproximadamente 2 millones. Por tanto, se estima que un máximo del 6% de los calefactores son renovados al año. Estos equipos cuentan con procesos de certificación que indican sus emisiones, sin embargo, existe un comercio informal de artefactos que no es posible cuantificar dados los alcances del presente estudio, dado esto, se considera que es de importancia al futuro, contar con herramientas que permitan determinar este mercado informal y las razones de su existencia, para así poder tomar medidas que permitan migrar a la comercialización de únicamente equipos certificados.



En base a los datos suministrados por la SEC y los precios de los calefactores del mercado, se observó que no existe una tendencia de aumento de precios para equipos con menor emisión de MP, solo se observó que el precio es dependiente de la potencia del calefactor. Esta no dependencia de la potencia se presume debido a un mayor tiempo de permanencia de los gases al interior de cámaras de combustión de mayor tamaño, característica de los equipos de potencias mayores, así como de las condiciones del ensayo actual del método CH-28, donde las corridas se realizan con las estufas a altas temperaturas, lo que difiere de la realidad. La no dependencia de la potencia es de importancia para la determinación de límites de emisión de los calefactores actuales del mercado, ya que, se establecen límites distintos para rangos de potencia térmica diferentes, aspecto que no es de relevancia en la actualidad para indicar niveles de emisión.

En base al análisis realizado con los datos de equipos certificados por la SEC, se observó que el 98% de los equipos certificados en los últimos cinco años, de potencias superiores a 8kW e inferiores a 14 kW, presentan emisión iguales o menores a 2,5 g/h, mientras que para estufas a pellet el valor es de cerca del 99%. Estos antecedentes indican que existe un gran margen de holgura en las emisiones que tienen permitidos estos equipos vs las de los resultados de los ensayos, de esta forma y considerando que la potencia no es un factor que afecte a las emisiones medidas en laboratorio, se plantea la posibilidad de establecer límites unificados para los equipos de potencias de hasta 25kW.

12.1. Etapa 3

Se levantaron tecnologías de abatimiento de emisiones para estufas a leña, cómo sistemas de filtros electroestáticos y sistemas catalíticos. Estos tienen cómo gran ventaja que pueden ser instalados en artefactos preexistentes, lo que puede ser una forma de reducir las emisiones de estos. Sin embargo, estos sistemas en la actualidad son costos, del orden del costos de una estufa, además de que no cuentan con retorno en la inversión, aspecto que podría desincentivar la adquisición de estos. En base a todo lo anterior, pueden ser una buena alternativa para programas piloto de empresas, como sistema de compensación de emisiones o como programas del estado.

De las entrevistas a los actores clave, no fue posible establecer cuáles son las mejoras a los diseños que tienen mayor potencial para la reducción de las emisiones, estos datos son secretos de las empresas y no se nos indicó. Sin embargo, existe un potencial de mejora, dado que en Estados Unidos se rigen por una norma más estricta con equipos en el mercado.

Otros artefactos cómo las cocinas a leña, debes ser estudiadas particularmente, buscando establecer un protocolo de ensayo que permita la cuantificación de las emisiones de MP dentro de un túnel de dilución, y a su vez es requerida la confección de un protocolo para

el suministro del energético. Se sugiere que el camino sea hacia establecer un protocolo que busque recrear las condiciones reales de operación, así como la elaboración de estudios de laboratorio que permitan testear estos protocolos y que den cuenta de los rango de emisión, para establecer los límites necesarios para una norma.

12.1. Etapa 4

La aplicación de la medida de filtros electroestáticos permite la reducción de un porcentaje considerable de las emisiones, sin embargo, esta se conlleva con un costo de inversión elevado, que es cercano al costo de un calefactor a leña nuevo. Esta situación sumado a que no existe un retorno en la inversión hacia las familias, lo hace un medida que se ve favorecida por iniciativas piloto de empresas privadas, o programas del estado que instalen este tipo de tecnología. Sin embargo, en la actualidad, es una alternativa que puede reducir las emisiones de los calefactores preexistentes del país.

12.1. Etapa 5

De acuerdo con el modelo de proyección, se observa que la mayor baja en emisiones en los próximos años se deberá a una evolución normal del mercado de calefacción en la zona centro sur, a calefactores a pellets y sistemas de bomba de calor, lo que se debe a los programas de recambio de calefactores, proyectos de compensación de emisiones y en general el mercado que ha aumentado la presencia de estos sistemas de calefacción. De esta forma, se estima que pasará de aproximadamente 103.000 t/año de MP 2,5 en la actualidad, a aproximadamente 65.000 t/año al 2033. Por otra parte, la disminución producto de la norma, será responsable entre 300 t/año y 24.000 t/año dependiendo del escenario normativo (menos exigente o más exigente). Esto implica en la importancia de la promoción y sensibilización de las nuevas tecnologías de calefacción de menos emisiones (calefactores a pellets y sistemas de bomba de calor)

Llegar a nivel de exigencias de norma de emisión para calefactores a leña similares a los de EE.UU. (2 g/h) parece adecuado, dado los niveles de contaminación de la zona centro sur de Chile. Esta medida provoca que el 42% de los equipos actualmente deban reducir sus emisiones en los ensayos para certificar sus emisiones, generando potencialmente mayores costos de los equipos al requerir modificaciones para cumplir la nueva norma. Esto podrían traducirse en un incremento de equipos hechizos, que deberá monitorearse cuidadosamente. Sin embargo, al analizar el precio de los equipos calefactores a leña, en función de su nivel de emisión, no se observan mayores correlaciones. Esto quiere decir, que equipos calefactores a leña de bajas emisiones pueden tener precios menores que



equipos de mayores emisiones para una misma potencia, por lo que al menos en la teoría, no deberían incrementarse mayormente los valores de los equipos.

En resumen, los escenarios normativos propuestos son:

- Escenario 1: Establecer el límite de emisión de MP a 2,5g/h para todos los calefactores a leña y pellet de hasta 25kW de potencia térmica.
- Escenario 2: Establecer el límite de emisión de MP a 2,5g/h para todos los calefactores a leña y pellet de hasta 25kW de potencia térmica, como una primera etapa, posterior a 5 años de la primera implementación, bajar el límite a 2,0 g/h de los calefactores a leña para igual la norma de Estados Unidos.
- Escenario 3: Establecer el límite de emisión de MP a 2,0g/h para todos los calefactores a leña y pellet de hasta 25kW de potencia térmica.
- Escenario 4: Establecer el límite de emisión de MP a 1.6 g/h para todos los calefactores a leña y pellet de hasta 25kW de potencia térmica.

Es importante migrar de los ensayos actuales de medición de emisiones para calefactores a leña (CH-28), que cuantifica el MP en condiciones teóricas de operación, a ensayos que midan las emisiones en condiciones reales. Esto ya ha sido levantado en el estudio de anteproyectos de norma de CONAMA en el 2006, y también en EE. UU., donde se está migrando a ensayos que permita conocer las emisiones en condiciones reales (encendido en frío, con tirajes cerrados y alta carga, al momento de recargar los calefactores, con combustible en condiciones reales, etc.). Una alternativa es considerar el ensayo Integrated Duty Cycle, desarrollado por el New York State Energy Research and Development Authority, y aprobado por la EPA, que testea equipos en diversas condiciones de operación, y que permite tener claridad respecto a las emisiones en situaciones reales de operación

En el caso de calefactores a pellets, que poseen condiciones estándares de operación (combustible con niveles de humedad estandarizados, alimentación y recarga constante sin disminución de temperatura del equipo, control automático del tiraje, etc.), no existen grandes diferencias entre la operación teórica del ensayo CH – 28 y la real. De esta forma, los límites de emisión actuales se acercan más a la emisión real de los calefactores, y podría mantenerse la norma actual para este tipo de calefactores.

La certificación de calefactores actualmente en Chile debe realizarse cada un año calendario, dentro de este plazo las empresas pueden certificar por lotes de artefactos, pudiendo almacenar estos para su posterior venta, incluso terminada la validez de la certificación. Fue recurrente en las entrevistas que los fabricantes e importadores de calefactores, que mencionaran que las certificaciones son costosas y al ser cada un año por modelo, eleva los gastos del negocio. Esta medida es para verificar que dentro de la producción no existan cambios en los materiales o diseño que eleven las emisiones de los calefactores, sin embargo, se indicó por parte de CESMEC y las empresas proveedoras, que

los resultados de los ensayos en laboratorio de un mismo modelo no tienen una variación significativa que cambie completamente los resultados del ensayo.

Para aumentar la competitividad en el mercado de calefactores a leña certificados, que en la actualidad consta principalmente de dos actores, se recomienda solicitar certificaciones de MP por modelo y no anualmente, ya que es una barrera de entrada en la actualidad para muchos fabricantes, que no pueden costear los ensayos para su nivel de ventas (aprox. 4 MM\$/certificado).

12.1. Etapa 6

Se observó que el mayor impacto en la reducción de las emisiones de contaminación por efectos de la calefacción a leña y pellet está dada por una tendencia del mercado a la disminución en el número de calefactores. Sin embargo, fue posible cuantificar la reducción de emisiones en base a los escenarios normativos propuestos.

Cada cambio normativo propuesto afecta de diferente forma al mercado de calefactores. En el escenario 1, solo se afecta al 2% de los calefactores a leña y al 1% de los equipos a pellet. Por consecuencia, la disminución en las emisiones de este fue marginal, pero con un efecto menor al mercado actual. Para el escenario normativo 3, el efecto en la reducción de emisiones fue mayor, implicando en que el 54% de los calefactores a leña deba disminuir sus emisiones en cerca de un 9%, con un efecto significativo en la cantidad de equipo que deberán cambiar sus diseños para lograr cumplir la norma. En el último escenario normativo se estimó que cerca de un 87% debe disminuir sus emisiones en aproximadamente 23%, pese a ser una medida que logra la mayor disminución de emisiones, también es la que mayor impacto tendría al mercado, provocando que prácticamente todos los modelos del mercado deban ser ajustados y modificados para lograr los nuevos estándares.

Estas disminuciones en las emisiones son sensibles a un posible aumento en la cantidad de equipo informales que puede provocar un aumento en los costos de venta de los nuevos equipos que sean comercializados en el mercado, por efecto de cumplir con las normativas más exigentes.

Estos escenarios se basan en las condiciones actuales de certificación y ensayos, considerando que deben ser implementadas dentro de plazos que permitan a los proveedores de equipos, poder vender el stock de calefactores y dar tiempo a que se adapten los diseños. Estas propuestas, no van en desmedro de lo anteriormente indicado, que es requerido migrar a un protocolo de ensayo que permita cuantificar las emisiones de los calefactores en condiciones realistas.

Es importante mencionar que el cambio en los límites de emisión producirá cambios en los equipos que entren al mercado nacional, esto puede elevar los costos de producción



subiendo el precio de los artefactos, aspecto que puede afectar negativamente al mercado de artefactos no certificados. Sin embargo, esto es incierto en su cuantificación, solo se pueden realizar supuestos, dado que los fabricantes no dieron esta información por secretos de empresa, así como acerca del mercado informal, no es posible cuantificar el efecto que tendrá en este, solo es posible analizar escenarios de aumento de venta de este tipo de equipos, donde las emisiones finales son sensibles a cambios en la entrada de una cantidad calefactores no certificados.

Dentro de las propuestas no se establecen los efectos que tendría la aplicación de la ley de biocombustibles, dado que su efecto en el mercado y las emisiones es incierto. Sin embargo, es importante fomentar el uso de energéticos que también sean certificados, para asegurar niveles de emisión inferiores. En las entrevistas a los actores clave, se destacó este aspecto, indicando que es un factor importante en las emisiones producto del usuario final, situación que no se puede cuantificar en los ensayos de laboratorio actuales.

La valorización económica realizada en base a la disminución de las concentraciones atmosféricas de $MP_{2,5}$ para los escenarios normativos propuestos, mostró resultado relativamente bajos, dado que la disminución en las emisiones también son bajas, sobre todo en zona norte del país. Sin embargo, se cuantificaron los efectos y beneficios económicos al respecto de aplicar cada uno de los escenarios normativos propuestos, siendo el escenario 4, el que mayor beneficio supone por la aplicación de límites más restrictivos.

Se evaluó la existencia de costos asociados a la aplicación de normas que cambien los límites de emisión de los calefactores a leña y pellet, observando que no existen costos asociados directos, salvo un posible costo de inversión de los fabricantes, aspecto que no fue posible cuantificar, dado que las empresas fabricantes no suministraron esta información, inclusive, este aspecto puede ser incierto para ellas mismas.

13. ANEXOS

14.1. Protocolo de medición establecido por la EPA

En específico, el sistema de muestreo para este método de prueba consta de un sistema de dos trenes de muestreo secos de doble filtro, ambos trenes se operan simultáneamente a una tasa de flujo de muestra que no exceda los 0,007 m³/min. Los resultados de ambos trenes son promediados para determinar las emisiones de MP y se comparan con el control de calidad para dar validez a los datos. Los resultados de los trenes son ajustados por los resultados de concentración de partículas de una muestra en el aire de la habitación donde se mide.

Cabe mencionar que el proceso de medición es independiente del método de alimentación, el cual es diferente para los equipos a leña y pellet, esto será abordado posterior a la explicación del método de muestreo.

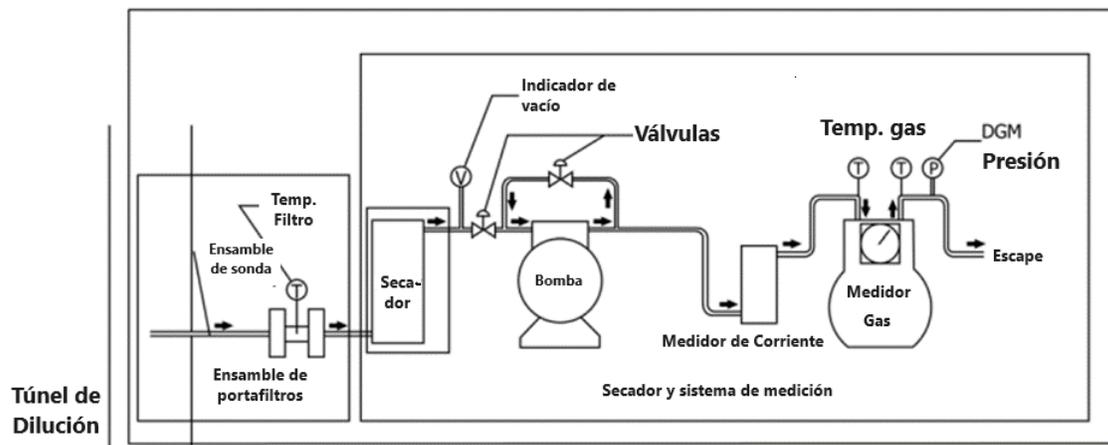


Figura 46, Diagrama del tren de medición de MP. Fuente: E2515-11(2017) "Standard Test Method for Determination of Particulate Matter Emissions Collected by a Dilution Tunnel"

En la Figura 46 se muestra un diagrama de los componentes que forman el tren de medición utilizados en este método de ensayo, y en la Figura 47 se hace detalle al sistema de filtros.

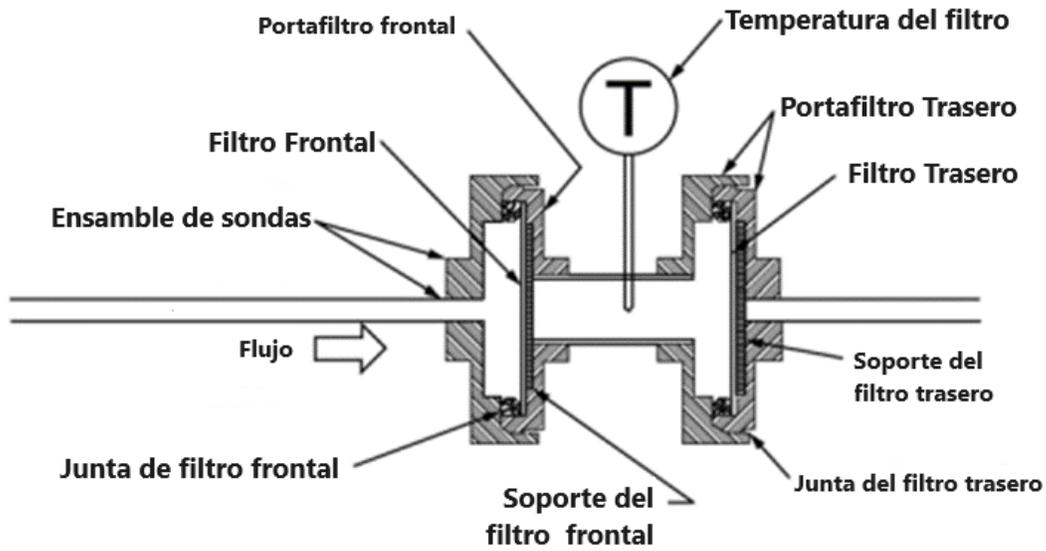


Figura 47, Diagrama de la disposición de filtros. Fuente: E2515-11(2017) "Standard Test Method for Determination of Particulate Matter Emissions Collected by a Dilution Tunnel"

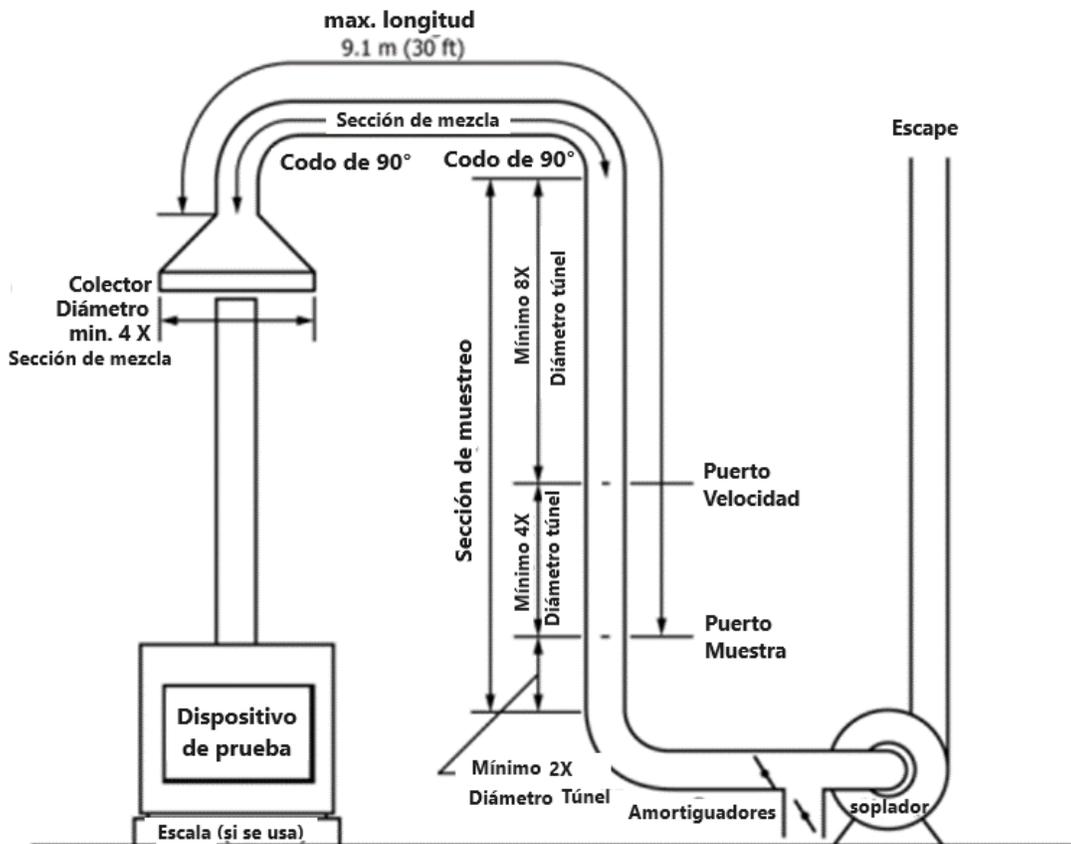


Figura 48, Diagrama del túnel de dilución.

En la Figura 48 se muestra un diagrama con los competentes que forman el sistema de medición del túnel de dilución, donde se aprecia la instalación del equipo a testear (Test Appliance), el cual está ubicado debajo de la campana de recolección de humos, así como la sección de medición dentro del sistema.

Los componentes requeridos para la medición son los siguientes:

- Para verificar la temperatura del filtro es necesario un sensor de temperatura con precisión de $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 75% de la lectura, este sensor se instala en la salida de los porta filtros delantero de modo que la punta del sensor este en contacto directo con el gas de la muestra, como se muestra en la Figura 47.
- Para medir la temperatura del gas en el túnel de dilución se utiliza un sensor de temperatura con la misma precisión del indicado anteriormente.
- Se debe incluir un sistema de secado para eliminar el agua del gas hasta un 1,5% de humedad, además de incluir un sensor de temperatura que verifique que la temperatura del sistema de secado es inferior a 27°C .
- Se puede incluir un sistema de medición con un manómetro para medir la presión atmosférica con la precisión de 62,5 mmHg o utilizar las mediciones barométricas de alguna estación cercana del Servicio Meteorológico Nacional.
- Se debe incluir un sistema de medición de gases capaz de medir el volumen de gas a muestrear.
- Además, se debe incluir un tubo de Pitot diseñado para medir el flujo en el túnel de dilución.
- El túnel de solución debe constar de los siguientes componentes:
 - Campana de acero, la cual debe ser lo suficientemente grande y cónica para capturar todo el flujo de gas de la combustión que sale por la chimenea.
 - Conducto de acero, donde se ubica la sección de mezcla y la sección de muestreo del túnel. En este también se deben ubicar dos puntos de extracción de muestras, del tamaño suficiente para permitir la entrada de las sondas.
 - Ventilador, que sea capaz de recolectar y mover todos los gases de combustión y el aire arrastrado desde la campana de extracción, hasta el túnel de dilución.
- Anemómetro, un dispositivo que sea capaz de medir la velocidad de aire inferiores a $0,10\text{ m/s}$. Este es utilizado para medir la velocidad del aire dentro de las instalaciones donde se realiza el muestreo de los equipos.
- Decantador, para eliminar la humedad de las sondas y filtros después de las pruebas.
- Balanza analítica, instrumento con una resolución de $0,1\text{ mg}$.
- Higrómetro o psicrómetro sling, para medir la humedad relativa del ambiente del laboratorio, con una resolución de 2% de HR.
- Sensor de temperatura, para medir la temperatura del entorno del laboratorio.

- Para la recolección de las muestras es necesario agregar un reactivo que sea capaz de secar el aire del interior hasta un contenido de 0,005 g/L o menos. Para eso se puede utilizar sulfato de calcio y decantador de tamizado molecular.

Para realizar las mediciones se sigue el siguiente procedimiento:

- Calibración de los instrumentos utilizados, según estándares establecidos en el método.
- Montaje y limpieza del túnel de dilución.
- Medición del tiro inducido, se dispone el sistema del túnel de dilución sobre los equipos sin encender y se opera el ventilador para determinar los efectos del equipo apagado.
- Pre quemado en la estufa, se enciende el equipo a la velocidad indicada para cada combustible.
- Captura de humo, se acciona el ventilador del túnel de dilución y se verifica que el 100% del humo es recogido por la campana, si esto no ocurre es necesario ajustar la distancia de la campana.
- Medición de velocidad, antes de iniciar el proceso de combustión, se realiza una medición de la velocidad del aire en el interior del tubo.
- Cálculo de la tasa de gas total.
- Mediciones transversales de velocidad.
- Secado de filtros sin polvo, se dejan secando los filtros a $20,6 \pm 5,6$ °C a presión ambiental por 24 horas.
- Pesaje de los filtros, se mide la masa de los filtros en intervalos de no menos de 6 horas, hasta que el peso sea constante (no más de 0,2 mg de diferencia entre mediciones consecutivas). Otros componentes con filtros pueden ser pesados en conjunto, siempre y cuando este identificado el contenedor.
- Preparación de los porta filtros, se etiquetan los filtros ya pesados sin contaminarlos. Se verifica que los filtros estén centrados y que las juntas estén correctamente colocadas, para evitar fugas.
- Colocación de filtros, se disponen los filtros para la medición de MP cuidando que estén centrados y que la junta este correctamente colocada para evitar fugas.
- Verificación de fugas previo a la prueba, se realiza una prueba en el tren de muestreo para verificar que no existan fugas en el sistema.
- Verificación de fugas posterior a la prueba, se debe realizar esta verificación al final de cada ciclo, antes de retirar las muestras.
- Verificación de temperatura de cada prueba, esta debe mantenerse entre 13 y 32 °C durante cada prueba.
- Verificación de velocidad del aire dentro del túnel, que sea menor a 0,25 m/s, sin fuego en la estufa. Se mide la velocidad del aire antes del encendido del equipo y una vez terminada la prueba.

- Medición de humedad relativa y temperatura ambiente, antes y después de la prueba.
- Operación del tren de muestreo, se verifica que el caudal de cada tren de dilución sea proporcional al caudal dentro del túnel de dilución (dentro del 10% de la relación de proporción inicial) y verificar que la temperatura del soporte del filtro no sea superior a 32°C. Si inicia el muestreo del aire de la habitación a una tasa de flujo de muestra de la sala con el 20% de la tasa de flujo de la muestra de aire del inicio.
- Registrar los datos requeridos en cada prueba al inicio y tomar otras lecturas necesario al menos cada 10 minutos durante la prueba. Además de realizar comprobaciones de que los manómetros no se desvíen por las vibraciones y cambios de temperatura del sistema.
- Durante la prueba, es requerido hacer ajustes que permitan que la temperatura entre los filtros esté en los niveles adecuados, las sondas se pueden enfriar para mantener la temperatura del filtro. No se deben cambiar los trenes de muestreo durante la ejecución de la prueba.
- Al final de la prueba se detiene el muestreo de partículas en el túnel, se retiran las sondas y filtros del túnel de dilución, se apagan las bombas, se registran las lecturas finales y se realiza la verificación de fugas posterior a la prueba. Se apaga el sistema de muestreo del aire de la habitación al mismo tiempo que los trenes de muestreo de partículas.
- Recuperación de la muestra, después de la verificación de fugas posterior a la prueba, se desconecta el conjunto del soporte del filtro del secador y del sistema de medición y se limpia con cuidado el exterior de la sonda con acetona, se tapan los extremos del conjunto del soporte del filtro, se identifica (se etiqueta) y se transfiere al área de recuperación de muestras de laboratorio. Se desmonta con cuidado el porta filtros, se retiran los filtros y las juntas identificando cada parte. Se llevan las muestras al área de pesaje del laboratorio. La sonda es pesada sin recuperar la muestra, sin usar solvente, para determinar el aumento de peso de la muestra.

14.1.1. Protocolo para el suministro de combustible

Como se ha indicado anteriormente, existen distintas formas de suministrar el combustible a las estufas para realizar la medición de emisiones de MP, en estufas a leña se utilizan cordwood o cribwood mientras que en estufas a pellet se utiliza un material granulado que es suministrado de forma automática por el equipo. Estos protocolos están establecidos en los documentos E2780-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters” para estufas a leña y en el E2779-10(2017) “Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Pellet Heaters” para estufas a pellet.

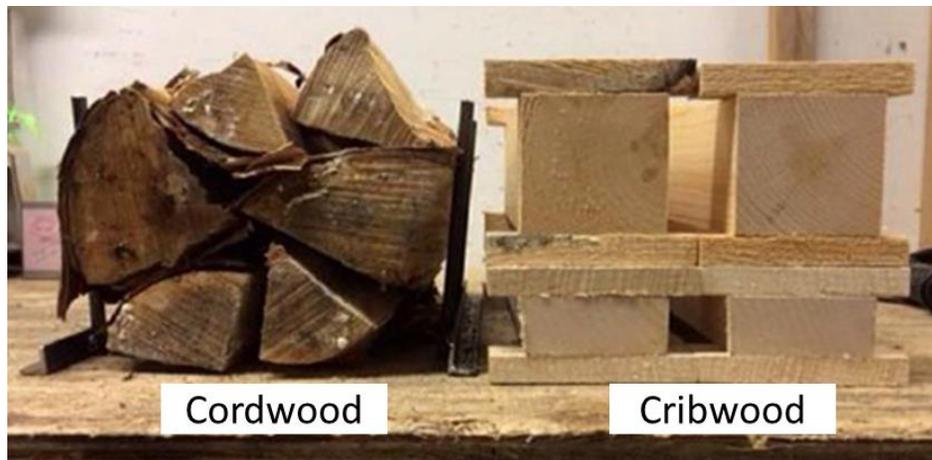


Figura 49, Imagen de una disposición de cordwood y cribwood para mediciones en estufas a leña.

Las principales diferencias en el método para estufas a leña es el formato del combustible, el método por cribwood corresponde a una disposición estandarizada de madera de 2 x 4 y 4 x 4 pulgadas, como se muestra en la Figura 50, mientras que en las mediciones con cordwood se utiliza leña en un formato cercano a la realidad de los hogares, pero indicando unas dimensión aproximadas de largo entre 30 a 60 cm de largo y máximo 4 pulgadas de ancho, aproximadamente 10 cm, como se muestra en la Figura 51.

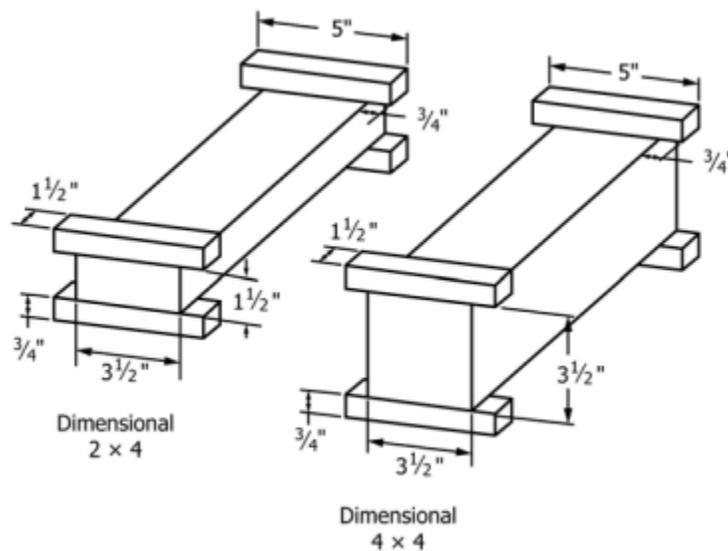


Figura 50, Diagrama de las dimensiones establecidas para la disposición de cribwood. Fuente: E2780-10(2017) "Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters"

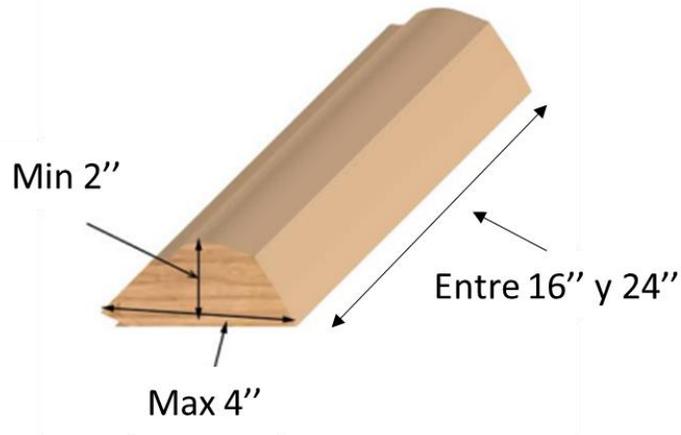


Figura 51, Diagrama de las dimensiones establecidas para la disposición cordwood. Fuente: E2780-10(2017) "Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Wood Heaters"

Tabla 57, Especificaciones de la leña a utilizar en el método de ensayo de la EPA.

Especie de leña	Contenido				Poder calorífico	
	%C	%H	%O	%Ceniza	MJ/kg	Btu/lb
Ash, white	49,70	6,90	43,00	0,30	20,75	8.927
Beech	48,70	5,80	44,70	0,60	18,80	8.088
Birch	49,80	6,50	43,40	0,30	20,12	8.656
Elm, rock	50,40	6,60	42,30	0,70	20,49	8.815
Maple, hard (black)	50,64	6,02	41,74	1,35	19,96	8.587
Maple, hard (sugar)	50,64	6,02	41,74	1,35	19,96	8.587
Oak, red	49,50	6,62	43,70	0,20	20,20	8.690
Oak, white	50,40	6,59	42,70	0,20	20,50	8.819
Pine, Southern, longleaf	52,60	7,02	40,10	1,30	22,30	9.594
Douglas Fir	48,73	6,87	43,90	0,50	19,81	8.522

El método para suministrar la leña consiste a grandes rasgos en el ingreso del combustible a equipos de ensayo, ejecutando pruebas individuales de tasa de quemado de bajas a máximas. La configuración del combustible se determina en función del volumen útil de la cámara de combustión y este se enciende para elevar la temperatura del equipo hasta una temperatura de funcionamiento normal. La medición se inicia pasado un tiempo hasta que se establezcan las condiciones requeridas para la prueba.

La tasa de quemado se establece en base al peso del combustible de prueba dividido por la duración de la prueba. El muestreo de partículas se inicia antes de agregar la carga de combustible de prueba y se detiene cuando finaliza la prueba

Para realizar las pruebas es necesario contar con:



- Medidor de humedad de madera, de funcionamiento de resistencia eléctrica, capaz de medir la humedad con una precisión del 1%.
- Balanza para el combustible de prueba, que sea capaz de medir el combustible con una precisión de 0,005 kg.
- Bascula de plataforma, capaz de medir el calefactor a probar junto a la chimenea y el combustible de prueba, con una precisión de 0,05 kg.
- Medidor de temperatura de los gases de combustión del calefactor, con precisión de 2,2 °C.
- Medidor de temperatura de la superficie de la estufa a leña, con una precisión de 2,2 °C.
- Medidor de temperatura para la salida de la cámara de combustión catalítica, que sea capaz de medir la temperatura de los gases que salen de la cámara de combustión catalítica de una estufa equipada con esta tecnología.
- Chimenea, para ser utilizada en la instalación de la estufa a leña en la prueba.

Para realizar la medición con el combustible se sigue el siguiente procedimiento de reacondicionamiento de la estufa a leña:

- Instalar la estufa según las indicaciones el fabricante sobre la báscula de plataforma.
- Instalar el dispositivo para medir la temperatura de los gases en el centro de la chimenea.
- Pre combustionar la estufa, antes de las pruebas, se realiza un pre encendido con astillas de madera y papel periódico, lo que permite contar con una base de fuego para luego cargar el combustible de pruebas.
- Operar la estufa por 48 horas a una velocidad de combustión media, usando combustible en formato cribwood o cordwood con un contenido de humedad de entre 15 y 25 % (las horas de operación no necesitan ser continuas).
- Registrar el peso del combustible y el tiempo en que fue agregado.
- Registrar la temperatura de los gases de combustión al menos una vez durante cada hora de funcionamiento de la estufa (en el caso de estufas con catalizador, se debe medir la temperatura de salida de la combustión catalítica cada una hora)
- Finalizado se deja enfriar la estufa a temperatura ambiente y se retira toda la madera, carbón, cenizas u otros desechos no quemados en la cámara de combustión.
- Limpiar la chimenea.

Un dato importante es la densidad de carga del combustible que de ingresa, para pruebas con cribwood, se requiere una densidad del combustible de entre 401 a 578 kg/m³ sin contar los clavos y espaciadores que unen la disposición. De esta forma la densidad de carga de combustible se establece entre 112,0 ± 11.2 kg/m³ del volumen útil de la cámara de combustión.

Para cordwood las cargas se calculan multiplicando el volumen de la cámara de combustión por 4,54 kg o en algunos casos una densidad de carga mayor si así lo indica el fabricante.

La tasa máxima de combustión se establece con la estufa operando con los ductos de aire ajustados para lograr la máxima tasa de combustión posible durante toda la prueba, en caso de estufas con control automático se debe configurar la salida máxima de calor.

Para tasas bajas los controles de aire para la combustión se establecen en los ajustes mínimos de funcionamiento que no sean completamente apagados y existen criterios para modificar las pruebas en casos que las tasas de consumo sean inferiores a ciertos límites. En cualquier caso, el laboratorio debe indicar los procedimientos realizados para lograr las tasas de combustión.

Posterior al proceso de pre-combustión, se debe realizar una tara (establecer el cero de peso) y se agrega el combustible sobre las brasas formadas, se registran las temperaturas requeridas y se inician las mediciones de MP según el método indicado anteriormente.

Para realizar las pruebas de emisiones con el túnel de dilución, se instala el equipo sobre la báscula de plataforma y se coloca la campana del túnel sobre la chimenea y se procede con las mediciones de MP indicadas previamente.

Una vez ingresado el combustible, se cierra la puerta del calefactor y se ajustan los controles de aire para la combustión deseada y se registran los datos en intervalos no mayores a 10 minutos, se registra el peso del combustible, las temperaturas, entre otros datos.

La prueba finaliza cuando el paso del combustible es 0,00 kg indicado por la báscula, dando termino a las mediciones de MP, registrando el tiempo de ejecución y los valores de medición finales.

14.1.2. Protocolo para el suministro de pellet

Dadas las características del combustible y el calefactor, se tienen en cuenta otras indicaciones para suministrar las estufas a pellet.

Al igual que en el protocolo anterior, se requiere de una báscula de plataforma de precisión 0,05 kg y dispositivos para medir temperatura de los gases de combustión de la estufa con una precisión de 2,2 °C.

Para realizar las pruebas es necesario al igual que en las estufas a leña, realizar un pre-acondicionamiento del calefactor, instalando el equipo según las indicaciones del fabricante sobre la báscula de plataforma y posicionado el sensor de temperatura en el centro de la chimenea. Se opera el equipo por 48 horas a una velocidad de combustión media definida utilizando cualquier combustible especificado por el fabricante (estas horas no necesitan ser continuas).

Se registran los tiempos de agregado del combustible y el peso de este, la temperatura de los gases de combustión al menos cada una hora de funcionamiento. Para finalizar se deja enfriar el calefactor a temperatura ambiente, se retiran todas las cenizas y desechos de la combustión y se limpia el sistema de ventilación.

Para realizar las mediciones se debe instalar el equipo de pellet en la sección de pruebas, según las instrucciones del fabricante y sobre la báscula de plataforma.

La ventilación de debe estar en concordancia con las instrucciones descritas por el fabricante (esto debe indicarse en los documentos de prueba entregados por el laboratorio) y se posiciona debajo de la campana del túnel de dilución para poder realizar las mediciones.

El combustible utilizado se analiza recolectando una muestra representativa para determinar su poder calorífico superior y el contenido de humedad.

Para suministrar el combustible se realiza una corrida de prueba conformada por ensayos a velocidades mínima, media y máxima. Para la tasa máxima la estufa a pellet debe operar con los controles establecidos para lograrlo según lo indicado en las instrucciones del fabricante, con tal de lograr la tasa de combustión más alta posible midiendo por 60 ± 5 minutos. La tasa media se establece en el control buscando una combustión menor o igual al 50% de la tasa máxima midiendo por 120 ± 5 minutos. La tasa mínima se establece indicando en el controlador las indicaciones para lograr el mínimo de combustión según lo indique el fabricante, o una tasa de combustión menor o igual a 0,50 kg/h, el criterio que sea mayor de estos, midiendo por 180 ± 5 minutos.

Para artefactos que se regulan automáticamente, encendiéndose o apagándose en base al calor requerido, las pruebas se realizan manipulando artificialmente los controles del equipo y se establecen para la tasa alta un segmento de medición de 60 minutos, para tasa media dos ciclos de 30 minutos encendido y 30 minutos apagado, y para tasa baja, se operan tres ciclos de 20 minutos de encendido y 40 minutos de apagado.

Para otros tipos de control se establecen otros criterios:

- Para equipos con dos configuraciones manuales de control de velocidad (alta y baja) se mide 300 ± 5 minutos en configuración baja y 60 ± 5 minutos en configuración alta.
- Para equipos con tres configuraciones manuales de control de velocidad (alta, media y baja) se establecen estas mismas tasas, midiendo 60 ± 5 minutos en alto, 120 ± 5 minutos en medio y 180 ± 5 en bajo).
- Para equipos con cuatro o más configuraciones manuales, se establecen los mismos criterios del punto anterior, buscando sean lo más reservativo a alto, medio y bajo.

El pre encendido de las estufas se realiza según lo indicado por el fabricante y se ajustan los controles en la prueba a una tasa alta de combustión, operando el equipo 1 hora antes del inicio de la prueba.

Posterior a la hora de pre-funcionamiento a una tasa alta de combustión se inicia el primer segmento de la prueba agregando la cantidad de combustible de prueba en el contenedor del equipo, según sea necesario para completar íntegramente la prueba, registrando el peso del combustible agregado. Luego se inicia la prueba y medición según lo indicado en el método del túnel de dilución, realizando todas las mediciones iniciales, intermedias y finales ya mencionadas. Pasado el tiempo de la medición a tasa alta ya indicado, se realiza la medición a una tasa media y luego de terminado esta se procede a medir en tasa baja. Finalizando todo el proceso según lo indicado en el método de medición de MP.

14.2. Protocolo de medición establecido por la Unión Europea

Las pruebas de emisiones se realizan quemando los combustibles de prueba especificados que representen los combustibles recomendados por los fabricantes a excepción de los equipos a leña, donde los ensayos se realizan en ciclos consecutivos para calcular el valor medio de las emisiones medidas.

Para todas las mediciones de emisiones, a cualquier tasa de salida de calor, se medirán respecto a una concentración media en mg del contaminante por m³ calculada para un contenido del 13% de O₂.

Al realizar la prueba, el calefactor que será medido debe instalarse de acuerdo con los estándares de cada equipo, en forma de triedro (simulando la instalación en una esquina de la habitación) o en un arreglo que simule la instalación de un equipo empotrado a la muralla.

Esta instalación debe realizarse sobre una báscula de plataforma para determinar el fin del ciclo de mediciones, pero si se utiliza la concentración de CO₂ no es necesario el uso de la báscula de plataforma.

Para equipos con instalación de triedro, estos deben instalarse de modo que los lados que dan a las paredes estén a una distancia mínima especificada en la instalación. Los equipos empotrados y los de cámara abierta, deben instalarse en huecos de chimeneas no combustibles o huecos de una resistencia al fuego comparable, las paredes del triedro pueden ser sustituidas por materiales no combustibles.

La salida de los gases de combustión del equipo se debe conectar por medio de un conector de gases de combustión no aislado y una adaptador de gases de combustión aislado a la sección de medición. Estos gases se extraerán de la parte superior de la sección de medición y se proporcionará un medio de ajuste para permitir que se mantenga un tiro constante en

la sección de medición, tal como se especifica en los procedimientos de prueba pertinentes (por ejemplo, mediante un ventilador de extracción).

El sistema de triedro consta de una chimenea, una pared lateral y una pared trasera, cada uno en un ángulo recto entre sí. En el caso de los equipos que se instalan en este sistema, se especifica la distancia entre el techo u otra parte de la construcción, inferior a 0,75 m, y en necesario medir la temperatura del techo. En la Figura 52 se observa un diagrama del sistema de triedro, donde se establecen las disposiciones que deben cumplir los equipos testeados para la medición.

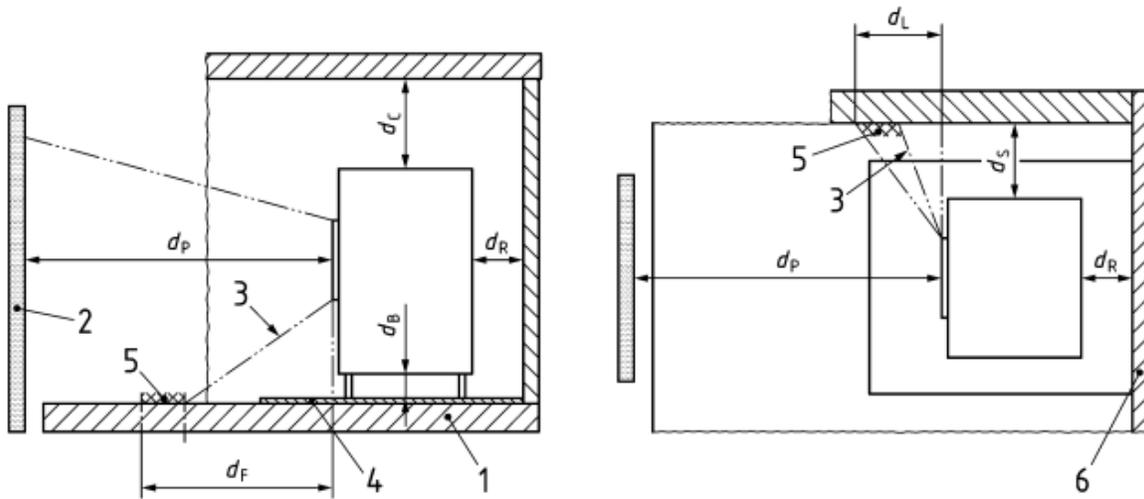


Figura 52, Diagrama de la instalación del sistema de triedro. Fuente: EN16510-1 "Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods"

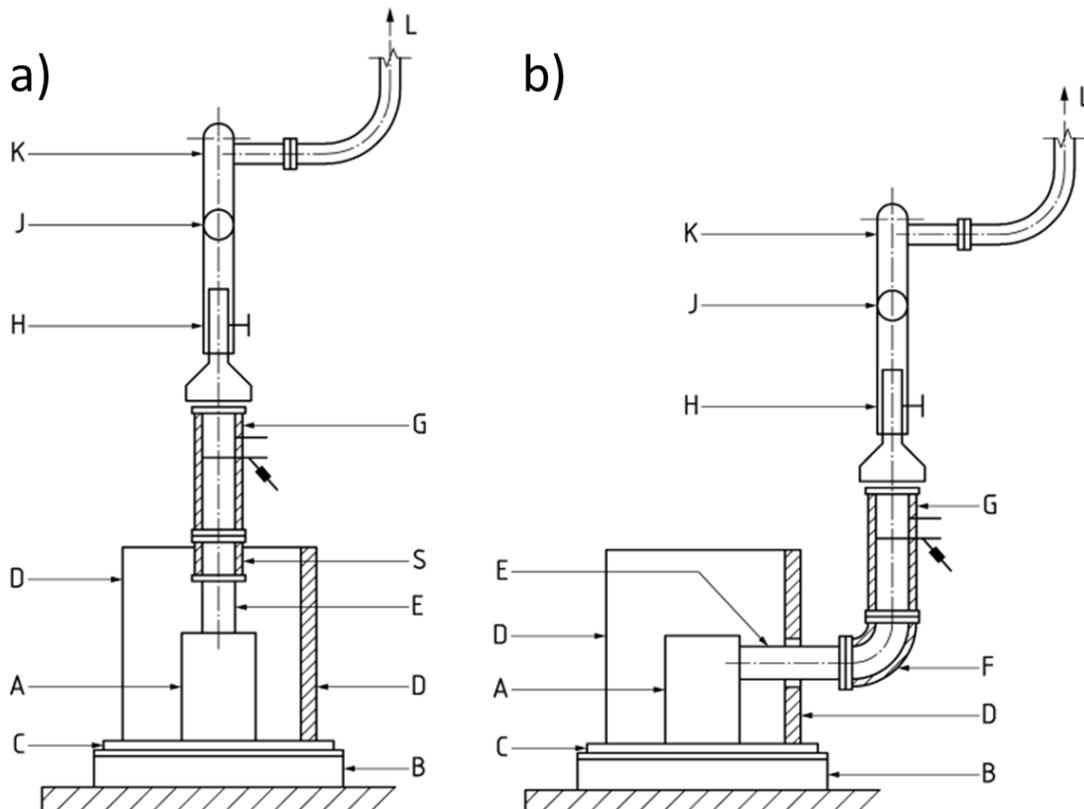


Figura 53, Diagrama de instalación del sistema, a) para chimenea con salida superior y b) con chimenea con salida posterior. Fuente: Fuente: EN16510-1 "Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods"

Para equipos con salida horizontal posterior de humos, la pared posterior del triedro puede tener una abertura por la que pueda pasar el conector de los humos.

La sección de medición debe contar con los medios para medir la temperatura y la composición de los gases de combustión y también con los medios para medir la presión estática. Esta debe estar completamente revestida con fibra minera de 40 mm de espesor o material similar para proporcionar una conductividad térmica adecuada a una temperatura promedio de 20°C.

Para medir la temperatura de los gases de combustión se deben utilizar termocuplas ubicadas dentro del ducto de succión, en el extremo sellado tocando la pared opuesta de la sección de medición y en el extremo de salida abierto conectado a una bomba de succión. Se debe sellar herméticamente el gas en la sección de medición.

Para medir los gases de la combustión se deben medir con una sonda de pirómetro la cual se debe conectar a la línea de muestreo calentada a lo menos 160°C, se debe incorporar al sistema de muestreo los medios para enfriar, limpiar y secar la muestra de gases de combustión. Los materiales utilizados para la línea de muestra deben ser resistentes a las temperaturas esperadas y no deben reaccionar ni permitir la difusión de los gases de



combustión. No debe haber fugas ni en las conexiones de la sonda de muestreo ni en la línea de muestreo de gas.

Para realizar las pruebas en equipos con puertas diseñadas para funcionar tanto abiertas y cerradas se deben medir ambos funcionamientos, para carga parcial y de combustión lenta.

Los equipos deben instalarse según las especificaciones del tipo de calefactor, conectando la salida de los gases de combustión a la sección de medición según sea requerido para el tipo de equipo. Para artefactos con salida de gases trasera el conector debe pasar a través de las partes del triedro.

Para cargar el combustible es la misma para cada secuencia de encendido de la misma potencia y se calcula según la Ecuación (7):

$$M_a = \frac{360.000 \cdot P \cdot t}{(H_{i,f} \cdot \eta)} \quad (7)$$

Donde M_a es la masa de carga del combustible en kg, $H_{i,f}$ es el poder calorífico inferior del combustible de prueba (en base a un combustible seco), sobre la base de la combustión en kJ/kg, η es la eficiencia mínima de acuerdo con la norma del aparato o un valor mayor según lo especificado en %, P es la potencia calorífica nominal en kW y t el intervalo mínimo de reabastecimiento de combustible, en horas, o la duración especificada.

El tipo de combustible estará definido por las recomendaciones indicadas por el fabricante, este será estandarizado bajo lo indicado en la norma y será suministrado al equipo a medir (dado que esta norma aplica gran cantidad de equipos a combustión, la cantidad de formatos de combustibles es variada, desde carbón, briquetas, pellet, leña, entre otros).

Se debe medir la temperatura de los gases de combustión y temperatura ambiente, de forma continua o en intervalos de 20 segundos.

14.2.1. Medición del material particulado MP

Esta medición consiste en la extracción de gases de la combustión por medio de un tren de muestreo que recoge las partículas sólidas en un filtro. Dentro del tren de muestreo, la sonda y el portafiltro se deben calentar a una temperatura de $180^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. La masa total del MP será recolectada en el filtro y se determinará para cada ciclo realizado de acuerdo con el método.

El tren de muestreo utilizado para las pruebas consta de una sonda de acero inoxidable, con un diseño que garantice que la temperatura de los gases de combustión muestreados en el filtro de las partículas se mantenga a $180^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, por medio de un calentamiento resistivo. Además de un filtro con eficacia del 99,95% medido un aerosol de prueba, este filtro no debe contener aglutinantes orgánicos ya que pueden influir en el pesaje y se recomienda

que sean de fibra de cuarzo, ya que los de fibra de vidrio podrían reaccionar con los componentes ácidos del gas de la combustión.

El portafiltro debe ser de acero inoxidable, PTFE o vidrio y debe ser capaz de retener los filtros antes descritos, este portafiltro se mantendrá a una temperatura de $180^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por medio de un calentador regulado termostáticamente. Se evitará cualquier fuga de aire en el interior del portafiltro mediante sellos apropiados, el diseño de este portafiltro debe ser tal que pueda ser colocado al final de la sonda de muestreo.

Se debe utilizar un secador de gas para eliminar la humedad de las muestras, un manómetro para medir la presión en la línea del tren de muestreo, un medidor de flujo de gas, para medir el caudal de gas en el tren de muestreo, una bomba de gas seco, para medir el gas seco y un sensor de temperatura, para medir la temperatura de los gases de combustión.

Previo a la medición, se deben:

- Acondicionar los filtros de MP, llevándolos a un horno a 200°C durante 1 hora y posteriormente guardarlos en un secador de vacío hasta que se enfríen a temperatura ambiente por al menos 8 horas. Pasado esto, se debe medir el peso del filtro por un minuto en una micro balanza.
- Limpiar las sondas y el soporte del filtro, enjuagándolos con agua y luego con acetona y secando con aire comprimido filtrado.
- Comprobación de fugas, se deben realizar una serie de mediciones para comprobar que no existan fugas en el sistema, el flujo de fuga debe ser menor al 2% del caudal normal durante el muestreo.

Para realizar el muestreo se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Precalentar la sonda de muestreo y el portafiltro a $180^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, introducir la sonda en el sector de medidas, evitando el contacto con cualquier parte de la chimenea para evitar que las partículas adheridas en la chimenea no contaminen la sonda.
- Se sella la abertura de entrada de la sonda en la chimenea para evitar entrada de aire.
- Registrar la temperatura de la muestra de gas de combustión en el filtro, la lectura del medidor de gas seco, la temperatura del medidor de gas seco y la presión ambiental del comienzo del ciclo.
- Se inicia la bomba de muestreo y se abre la válvula de cierre directamente después de recargar el aparato.
- Se establece un flujo constante de 10 l/min ($0,6 \text{ m}^3/\text{h}$).
- Se realizan las mediciones respecto a los tiempos indicados en el método, comprobando cada 5 minutos que el caudal y ajustando de ser requerido. Los tiempos de algunos tipos de equipos se indican a continuación:



- Estufa a leña: 3 mediciones a carga nominal hasta completar el ciclo y 3 mediciones a carga parcial hasta completar el ciclo o un máximo de 120 minutos continuos.
 - Chimenea empotrada: 3 mediciones a carga nominal hasta completar el ciclo y 3 mediciones a carga parcial hasta completar el ciclo o un máximo de 120 minutos continuos.
 - Estufa a pellet: 2 x 3 mediciones a carga nominal de 30 minutos cada una y 6 mediciones a carga parcial de 30 minutos cada una.
 - Cocinas a leña: 3 mediciones a carga nominal hasta completar el ciclo y 3 mediciones a carga parcial hasta completar el ciclo o un máximo de 120 minutos continuos.
- Se debe medir la temperatura de la muestra del gas de combustión en el filtro.

Para medir las estufas a pellet se debe realizar el siguiente proceso para carga nominal:

- 30 min de funcionamiento sin medición.
- 30 min filtro 1er muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 2° muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 3er muestreo y análisis correspondiente.
- Esto se repite para cada prueba obteniendo 3 datos de sondas de filtro.

Para Para medir las estufas a pellet se debe realizar el siguiente proceso para carga parcial:

- 30 min de funcionamiento sin medición.
- 30 min filtro 1er muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 2° muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 3er muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 4º muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 5º muestreo y análisis apropiado.
- 30 min de funcionamiento sin medición (el filtro puede cambiarse en ese período).
- 30 min filtro 6º muestreo y análisis oportuno.
- Esto se repite para cada prueba obteniendo 6 datos de sondas de filtro.

Finalizadas las pruebas se retira el filtro del portafiltro y es secado a 180°C durante al menos 1 hora, se enfría a temperatura ambiente en un secador de vacío por al menos 8 horas, luego se mide el peso del filtro en una micro balanza de precisión de 0,01 mg.



14.2.2. Medición de óxidos de nitrógeno (NO_x)

El método de medición para determinar los NO_x en los gases de combustión de los equipos que queman combustibles sólidos, es una medición continua, cuyo resultado se expresa en equivalentes de dióxido de nitrógeno NO₂.

Este método se basa en los documentos EN 14792:2017 que describe el método de referencia para la determinación de la concentración másica de óxidos de nitrógeno (NO_x), EN 14793:2017 que proporciona una metodología para validar un método alternativo en comparación con un método de referencia y la ISO 10849:1996 que cubre las características de rendimiento de los sistemas de medición automatizados para determinar las concentraciones de óxidos de nitrógeno como métodos alternativos que necesitan ser validados contra el método de referencia.

La medición de referencia de la EN es por detección de quimioluminiscencia (la norma ISO no especifica el método de medición), esta se utiliza para determinar los compuestos de nitrógenos totales (NO y NO₂) y requiere el uso de convertidor de NO₂ a NO.

El sistema de medición consta de los siguientes componentes:

- Instrumento analítico (dependiendo del método)
- Sonda de gas con filtro de limpieza de partículas, esta debe ser de un material adecuado como acero inoxidable. El filtro se calienta para evitar la condensación hasta una temperatura de 195°C.
- Línea de muestra, que se calienta a la misma temperatura del filtro.

El flujo de gas para las pruebas se extrae desde el punto de medición con la sonda, el cual es analizado mediante un sistema de medición completo, que dependen del método, los cuales están detallados a continuación:

- **Método de quimioluminiscencia:** Consiste en la reacción de ozono (O₃) con NO la cual forma NO₂ compuesto que tiene reacción fotoquímica. En el proceso de medición las moléculas de NO₂ pueden irradiar luz en el rango de longitudes de onda de entre 590 nm y 3.000 nm. La intensidad de la luz depende del contenido de NO y es dependiente de la presión y presencia de otros gases. El contenido de NO se determina midiendo la intensidad de la luz emitida, en el proceso es posible la interferencia de dióxido de carbono (CO₂) presente en el gas de muestreo, el cual es especialmente afectado por el vapor de agua ya que entre ellos hay reacción de quimioluminiscencia. Las correcciones necesarias se realizan en la salida del analizador, ya sea por curvas de corrección de referencia proporcionadas por los fabricantes o mediante una calibración de los gases que contengan aproximadamente la misma cantidad de CO₂ que el gas de la combustión. Los analizadores de quimioluminiscencia utilizados para medir las emisiones se



extienden desde 10 mg/m^3 hasta $20\,000 \text{ mg/m}^3$ y algunos de estos equipos cuentan con convertidores de NO_2 a NO incorporados.

- **Método de infrarrojo o dispersivo (NDIR) (ISO 10849:1996):** Para realizar estas mediciones por dispersión de infrarrojo son según el método NDIR, donde los gases de distintas moléculas absorben luz en el espectro del infrarrojo y se mide la absorción total de las moléculas de NO . La radiación emitida por las fuentes de infrarrojo se divide en dos haces modulados, uno pasa a través de la celda de medición y el otro a través de la celda de referencia que contiene gas que no interactúa con el infrarrojo (generalmente nitrógeno). En el proceso de medición el contenido de NO del gas de la combustión absorbe parte de la energía de la luz infrarroja y la diferencia medida es proporcional a la cantidad de NO en la muestra. Estos detectores están diseñados para ser sensibles solo en las longitudes de onda donde absorbe el NO , pero en las mediciones es posible la interferencia de otras moléculas, principalmente de vapor de agua.

La medición de las concentraciones de NO_x se realizan por medio de:

- Una línea de muestreo de acero inoxidable, vidrio de borosilicato o cerámica, un material que sea adecuado para resistir la corrosión y temperaturas superiores a 250°C , pero el acero inoxidable puede alterar la proporción de NO y NO_2 .
- Un filtro de material inerte (cerámica, o metal sintetizado con tamaño de poro adecuado), el cual es calentado por encima del punto de rocío del agua o del ácido. Este filtro debe cambiarse o limpiarse periódicamente dependiendo de la carga de polvo en el sitio de muestreo.
- Bomba de muestreo, si el analizado no cuenta con una bomba integrada, es necesaria una bomba externa para extraer el gas de combustión que será muestreado. Esta debe ser capaz de operar según los requisitos de flujo especificados por el fabricante del analizador y a las condiciones de presión requeridas. Esta bomba debe ser resistente a la corrosión y deberá ser de materiales que no reaccionen con los NO_x ni lo absorban en su estructura.
- Filtro secundario, para separar el polvo fino, debe ser de un tamaño de poro de 1 mm a $2 \mu\text{m}$ (por ejemplo, un filtro de fibra de vidrio, cerámica sintetizada, acero inoxidable o fibra de PTFE).
- Convertidor de NO_2 , se debe incluir en el sistema de medición un sistema que convierta el NO_2 a NO , pudiendo ser capaz de convertir al menor el 95% del NO_2 . Este debe consistir en un horno calentado a una temperatura constante y puede estar hecho de materiales como acero inoxidable, molibdeno, tungsteno, carbono espectroscópicamente puro o cuarzo.

El sistema de medición completo incluye la unidad de acondicionamiento, la línea de muestreo y el analizador, estos deben llevarse a la temperatura requerida, posterior a esto

el caudal de gas pasa por el sistema de muestreo donde es analizado por el equipo escogido, ajustando el caudal a este equipo (el cual debe ser constante).

Una vez instalados los sistemas de muestreo, se debe comprobar el correcto funcionamiento del sistema, cumpliendo con los requisitos y limitaciones del equipo analizador.

Se deben realizar los siguientes ajustes preliminares:

- Gas cero, se mide un gas sin contenido de NO_x .
- Gas patrón, se mide un gas con concentración certificada de NO o NO y NO_2
- Ajustar analizador, con las pruebas del gas cero y gas patrón, se realiza el ajuste al analizador, para asegurar la medición de valores correctos.
- Ajuste del sistema de muestreo, al suministrar los gases cero y patrón se debe asegurar el correcto funcionamiento del sistema de medición, verificando que no existan fugas en la línea de muestreo.
- Verificación después de la medición, al finalizar las pruebas se realizan verificaciones del cero y el rango del sistema de muestreo, documentando los resultados, y ajustando en caso de variación en sistema.

14.3. Detalle de experiencias internacionales

14.3.1. Experiencias en Europa

Polonia, Eslovenia y Republica Checa

En Polonia, ciudades como Cracovia han sido una fuente importante de contaminación atmosférica, esto debido a la calefacción residencial y la combustión de madera en estufas tradicionales. Esto se debe al gran número de personas que utilizan la leña como fuente de calefacción durante los meses de invierno, lo que contribuye a altos niveles de MP y otros contaminantes¹¹⁶. Polonia realizó una revisión de su Programa Nacional de Control de la Contaminación del Aire, cuyo principal objetivo fue la reducción de volumen de emisiones. Este objetivo se abordó tomando acciones en el sector energético, transporte, municipal y residencial. A pesar de que la mayoría de las políticas de este país están dirigidas al sector de energía y transporte, existen asambleas provinciales de donde surgen las ideas de recambio de calefactores junto con una modernización térmica y resoluciones como la num. CXXI/1918/14 de Ayuntamiento de Cracovia sobre la adopción del Programa de

¹¹⁶ Review of the National Air Pollution Control Programme – Poland
<https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/758a8aec-8f9c-47c2-925b-27857c176746/details>

Reducción de Bajas Emisiones de la Ciudad de Cracovia, donde se establece que desde Septiembre de 2019 está prohibido la queda de carbón y leña en calderas, estufas y chimeneas. Como resultado de la implementación de políticas y actividades de reducción de emisiones existentes, en el periodo 2010 al 2017, el promedio de las emisiones de MP_{2.5} disminuyeron de 28 µg/m³ a 22 µg/m³ ¹¹⁷. También aseguran que implementación de requisitos de calidad para los combustibles sólidos, implementará hasta 2020, por lo que un cambio visible en el inventario de emisiones se vería después.

Para otros países de Europa la situación es similar, en Eslovenia, en donde sus áreas rurales y zonas montañosas la calefacción a leña ha sido una práctica común, lo que ha llevado a problemas de calidad del aire, especialmente en los meses más fríos¹¹⁸. Eslovenia implementó medidas como: Mayor promoción de la sustitución de antiguas plantas de combustión de biomasa de madera por otras modernas o bombas de calor, restringir la venta de equipos de biomasa ineficientes, las instalaciones por personas certificadas con la obligación de enseñar como utilizar bien el producto, establecer las condiciones para la prestación profesional de servicios de deshollinamiento y capacitaciones, sensibilizar y educar a los usuarios de aparatos de biomasa de madera sobre el combustible adecuado y su correcto funcionamiento, proyectos de demostración sobre técnicas adecuadas de quema e incentivos para instalación de filtros.

En República Checa el uso de la leña en estufas y calderas también ha sido un desafío para la calidad del aire en algunas áreas¹¹⁹. Este país presentó un Programa Nacional de Control de la Contaminación del Aire y lo publicó el 13 de enero de 2020, donde se realizó una actualización del programa donde se establecen ayudas para cambiar las fuentes de calor en el sector residencial, mejorar la calidad de la leña, endurecer los requisitos para el almacenamiento y la aplicación de fertilizantes. Además, se incluyó la reducción del consumo de combustibles sólidos mediante el ajuste del subsidio de vivienda, mejora en la calidad de servicios de educación sobre calefacción. La reducción de emisiones de MP_{2.5} se redujeron un 14% entre 2005 y 2017.

Algunos países que destacan por su toma de medidas con relación a las emisiones de estufas de combustión y planes para la integración progresiva de nuevas tecnologías en ecodiseño son Dinamarca, Austria y Bélgica.

¹¹⁷https://environment.ec.europa.eu/topics/air/reducing-emissions-air-pollutants/national-air-pollution-control-programmes-and-projections_en

¹¹⁸ Review of the National Air Pollution Control Programme – Slovenia
<https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/aa25d0f1-7ac8-401b-a06a-7515d8fa83b7/details>

¹¹⁹ Review of the National Air Pollution Control Programme – Czechia
<https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/4bdd7b56-9942-4f61-9d45-96c4b7041675/details>

Dinamarca

En el año 2019, en Dinamarca¹²⁰ se introdujo el concepto de "Programa Nacional de Reemplazo de Estufas de Combustión" (NAPCP), el cual implica principalmente el cambio de estufas contaminantes. Esta iniciativa fue acompañada por una reducción significativa de 48% en las emisiones de MP_{2.5} entre 1990 y 2020. Esta disminución se atribuye a las mejoras implementadas en los sectores de energía y transporte. A continuación, se detallan las principales políticas de este programa.

- Recambio de estufas de combustión de leña, con una financiación de 45 millones de DKK, equivalente a aproximadamente 6.7 millones de dólares o cerca de 5.5 mil millones de pesos. Logando cambiar 19.000 unidades entre 2003 y 2019.
- Meta de reemplazo de 50.000 estufas a leña entre 2003 y 2030, con lo cual se estima una reducción de PM_{2.5} de 0,535 kt/año
- Aplicación de Eco-design en los requisitos de las estufas a leña nuevas.
- Proyecto de ley para prohibir las estufas a leña viejas (anteriores a 2008) en áreas donde la calefacción distrital esté disponible.

En Dinamarca, se establecieron límites de emisión en 2008 para la liberación de partículas en onuevos equipos de calefacción de pequeña escala, como las estufas de leña. A partir de entonces, los esfuerzos para reducir las emisiones de partículas se han centrado principalmente en la aceleración y el reemplazo de las instalaciones de combustión más antiguas, dado que, en promedio, los equipos más antiguos emiten aproximadamente cinco veces más partículas que las plantas modernas¹²¹.

En 2021, entró en vigor un plan de cambio de propiedad, que establece los requisitos para que las estufas de leña anteriores a 2003 sean reemplazadas en relación con los cambios de propiedad. Se espera que el esquema implique el reemplazo de alrededor de 50.000 estufas de leña más antiguas hasta 2030 en comparación con el ritmo de reemplazo que habría ocurrido de manera natural. Se estima que esto conducirá a una reducción de las emisiones de partículas de 535 toneladas al año en 2030, lo que corresponde a un efecto acumulado en el período 2020-2030 de 4.370 toneladas de partículas y hacia 2040 un efecto general durante el período de 9.340 toneladas de partículas.

En 2021, se adoptó un proyecto de ley que permite a los municipios decidir si desean prohibir todas las estufas de leña antiguas anteriores a 2008 en áreas con calefacción urbana o gas natural. A partir del 1 de enero de 2023 se puede optar a la aplicación de la

¹²⁰ Review of the National air Pollution Control Programme – Denmark
<https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/7d250801-1abf-4deb-bc44-3119f42b1bf3/details>

¹²¹ National Air Pollution Control Programme, Denmark, 2023
<https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/09313163-f69a-4e6f-ab61-7b9752aad38e/details>

prohibición del uso de las estufas. El efecto de esta medida dependerá de cuántos municipios opten por hacer uso de esta opción ya que es opcional¹²².

A partir de 2022, los requisitos para las nuevas estufas de leña se han armonizado en toda la UE en virtud de la Directiva del Ecodesing, que se espera que conduzca a importantes reducciones en la contaminación del aire, ya que muchos países no tienen actualmente requisitos ambientales para las nuevas estufas y calderas de leña.

Portugal y Dinamarca

En 2016 se realizó un estudio¹²³ en 24 viviendas en los países de Portugal y Dinamarca para analizar los comportamientos de la quema de leña y su contribución a la calefacción residencial, haciendo una comparación entre tres tipos de estufas. Para ello se hicieron simulaciones de laboratorio para conocer su eficiencia energética, las emisiones asociadas de MP_{2.5} y la influencia de su uso en el interior, demostrando que las estufas cerradas en hogares ibéricos no aislados emiten más MP_{2.5} que los umbrales de diseño ecológico y no puede proporcionar una temperatura estable.

La adopción de reformas de estufas más avanzadas y dispositivos digitales es una medida relevante para cumplir los objetivos de diseño ecológico a través de una mejor regulación de las cargas de combustible y las entradas de aire de combustión.

Noruega

Un estudio¹²⁴ realizado en Noruega el año 2012 realizó una evaluación sobre instrumentos regulatorios para reducir emisiones de MP en áreas urbanas evaluó tanto el efecto potencial como el real de un programa de subsidios para el intercambio de estufas que ha estado en vigencia hace más de 20 años. Este programa de subsidios brinda un apoyo económico para que los habitantes cambien sus estufas por unas más limpias para reducir las emisiones de MP.

En el estudio se evaluó el potencial de reducción de emisiones y niveles de contaminación a través de la modelización de emisiones y dispersión bajo distintos escenarios, para luego evaluar las reducciones reales asociadas a las estufas ya reemplazadas con el subsidio. Estos datos se obtuvieron a través de la variación en emisiones, consumo de madera y factores de emisión en una ciudad entre 2005 y 2018.

¹²²<https://www.themayor.eu/en/a/view/new-law-allows-danish-municipalities-to-ban-old-wood-burners-10390>

¹²³ <https://vbn.aau.dk/en/publications/transition-to-an-intelligent-use-of-cleaner-biomass-stoves>

¹²⁴

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020302648#:~:text=Results%20from%20emission%20and%20dispersion,levels%20\(up%20to%2021%25\)](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020302648#:~:text=Results%20from%20emission%20and%20dispersion,levels%20(up%20to%2021%25)).

Finalmente, los resultados del modelo de emisiones y dispersión mostraron que el reemplazo de estufas podría tener un efecto significativo en la reducción de emisiones de hasta un 46% y en niveles de MP de hasta un 21%. A pesar de estos datos obtenidos, la realidad es que solo el 8% de las estufas han sido reemplazadas en la ciudad de Oslo, lo que se traduce en una disminución máxima de entre un 3% y 6% de las emisiones para el año 2018, significativamente menor a las proyecciones referentes al potencial total. Además, se notó en este estudio que entre municipios que cuentan con un programa de subsidios y los que no cuentan con uno, no existe una diferencia notable en la disminución de contaminación (dado el resultado anterior de Oslo), sin embargo, los análisis mostraron un gran potencial en el programa de subsidios.

14.3.2. Experiencias en Estados Unidos

California

En California se implementaron estrategias para reducir emisiones de contaminantes climáticos de vida corta (CCVC); como el carbono negro, el metano y algunos gases, ya que estas emisiones son responsables aproximadamente del 40 % de del cambio climático actual.

Esta implementación buscó conseguir las siguientes metas:

- Para el año 2030 en comparación con los niveles del 2013:
 - 50% de carbono negro antropogénico
 - 40% del metano y de los HFC
- Convertir el estiércol y los residuos orgánicos en valiosos productos energéticos y abono para la tierra
- Reducir la eliminación de productos comestibles enviándolos a centros de alimentos y otros canales de distribución.
- Reducir las emisiones perjudiciales de las **estufas de leña residenciales**
- Acelerar la reducción de la fuente de emisiones GEI de mayor crecimiento tomando como base los acuerdos de reducción paulatina de HFC a nivel mundial.

En cuanto a los costos asociados a esta implementación, el Proyecto de Ley de la Asamblea 1613 y el proyecto de Ley del Senado 859 exponen un plan de gastos orientado a la reducción de emisiones de CCVC. \$5 millones para la reducción del carbono negro del humo resultante de la quema de leña, \$40 millones para la reducción y gestión de residuos, \$7,5 millones para Tierras Saludables y \$50 millones para reducciones de emisiones de metano producto de las operaciones lecheras y ganaderas.

En California se notó una gran reducción producto a la reducción de emisiones de vehículos en carreteras, en particular de diésel, pero con el tiempo los contribuyentes más significativos a las emisiones de carbono negro se encontraron en las estufas de leña y las chimeneas, entre otros, siendo estos más de tres cuartos de las emisiones. Estas emisiones fueron reducidas en un 30% para el año 2000, gracias a la transición a usos más ecológicos

y eficientes de energía y la reducción de emisiones en estufas a leña y las chimeneas. Esta nueva implementación busca una mayor reducción de las emisiones de carbono negro y junto a el CARB, quien colabora con los distritos de aire locales para reducir aún más las emisiones de partículas y carbono negro proveniente de las estufas de leña y chimeneas.

emisiones de partículas y carbono negro proveniente de las estufas de leña y chimeneas.

Tabla 58, Resumen de las medidas nuevas propuestas de CCVC y estimaciones de reducciones de Emisiones (MMTCO_{2e}) para carbono negro (antropogénico).

Nombre de la medida	Reducciones de emisiones anuales 2030	Emisiones anuales 2030
BAU 2030 (Business as Usual, reducciones producto de la implementación de las normas actuales)	-	26
Conversión de chimeneas y estufas de leña residenciales	3	-
Medidas de plan de implementación estatal y metas de energía no contaminante	4	-
BAU 2030 con medidas nuevas	-	19

Políticas de quema de leña para reducir emisiones y mejorar la salud pública¹²⁵

Dentro de las políticas se pueden encontrar enfoques técnicos agrupados en dos categorías generales:

1. Cambiar la estufa a leña o chimenea

Para ello se han creado políticas públicas y programas de reemplazo de las estufas actuales por una menos contaminantes, que viene siendo las estufas certificadas por la EPA disminuyendo la emisión de PM 2,5. Sin embargo el rendimiento de la estufa y sus emisiones son afectadas por el usuario, como por ejemplo en el uso de material a quemar. Además, los métodos de prueba actuales requeridos no reflejan las condiciones de uso real, ya que pueden emitir más contaminantes dentro del hogar que en el laboratorio.

Por estos motivos algunas instituciones optan por exigir o fomentar la sustitución de los calentadores de leña por estufas de pellets o por dispositivos que implican otros combustibles como bombas de calor eléctricas.

2. Usar prácticas adecuadas de quema de leña:

¹²⁵ <https://www.eli.org/sites/default/files/eli-pubs/wood-burning-report-april-2021.pdf>

La forma de utilización de las estufas a leña impacta directamente en su cantidad de emisiones. Por consiguiente, las prácticas incluyen utilizar el combustible adecuado como madera seca con contenido húmedo inferior al 20% y curada al menos 6 meses, la cuales se dividen, apilan y almacenan al aire libre, y también la construcción y mantención del fuego de forma adecuada, esto a través de un seguimiento de temperatura y posición de la compuerta, la cual debe estar cerrada para controlar el flujo de aire y minimizar contaminantes en el hogar.

Algunas de las estrategias políticas actuales en Estados Unidos:

- Normas de emisiones y certificación para dispositivos de combustión a leña

La EPA implantó estas normas en 1988, realizaron una actualización en 2015 donde establecieron nuevos estándares para calentadores de leña nuevos que no habían sido aún regulados, incluyendo los de combustión única y pellets. La última versión entró en vigor en mayo de 2020.

- Venta, transferencia e instalación de dispositivos
 - Restricción de ventas o transferencias de estufas que no sean compatibles a la norma, requiriendo una regulación de remoción o destrucción.
 - Colorado: Prohibición de la venta de dispositivos nuevos o usados a menos que estén certificados¹²⁶
 - Oregón: Prohibición de venta de estufas usadas a menos que obtengan una certificación para su venta como las nuevas (certificación EPA o del estado)¹²⁷
 - Vermont: Prohibición de la venta o compra de estufas desde el 15 de diciembre de 2015, a menos que esté certificada por la EPA.¹²⁸
 - Washington: Prohibición de vender, ofrecer, anunciar la venta, negociar, intercambiar o regalar dispositivos de combustible sólido a menos que esté certificado y cumpla con los estándares de emisión.¹²⁹
 - Alaska: prohibición de vender, transportar o arrendar una estufa a leña o de pellets a menos que este esté certificado y cumpla con un límite de emisión anual de 2,0 gramos por hora.¹³⁰

¹²⁶ 5 Co. Admin. Code §§1001-6:II(A),(D); Co. Stat. §25-7-405.5. See also 5 Co. Admin. Code §1001-6:I(A)(17) (defining a “new wood stove” as “any wood-burning stove other than one which was sold to an individual for personal use prior to January 1, 1987”).

¹²⁷ Or. Rev. Statutes §468A.500.

¹²⁸ Vt. Admin. Code 12-031-001, §§5-204(c)(1), (d)(1).

¹²⁹ Wash. Admin. Code §173-433-100; Rev. Code Wash. §70A.15.3530.

¹³⁰ 18Ak. Admin. Code §§50.077(a),(c).



- Washoe, Nevada: Exigen un informe de ventas de dispositivos e informar alguna venta dentro de los 30 días a través de un formulario y pagar una tarifa¹³¹.
- Limitar en nuevas construcciones las instalaciones de calentadores de leña, chimeneas y establecer estándares para el proceso. Las políticas se aplican a la instalación de calentadores de leña en general, incluidas viviendas existentes:
 - Exigir que los nuevos dispositivos sean certificados por la EPA:
 - Portola, California: Prohibición de la instalación de calentadores de leña en una residencia u otra estructura dentro de los límites de la ciudad que no estén certificados por la EPA al momento de la venta o transferencia¹³².
 - Utah: Prohíbe la instalación de estufas a leña sin certificación EPA¹³³.
 - Oregón: Prohíbe la instalación de estufas usadas, a menos que el dispositivo esté certificado para su venta como nuevo¹³⁴.
 - Washoe, Nevada: Prohibición de una instalación nueva de un calentador a leña en una propiedad existente a menos que sea de baja emisiones, es decir, debe cumplir con la tasa de emisión de 1,0 gramos o menos de partícula por hora¹³⁵.
 - Missoula: desde 1994 solo se pueden instalar, en la zona de estancamiento de aire, estufas de leña y de pellets con emisiones que no excedan 1,0 gramos por hora. Fuera de esta región, se pueden instalar estufas certificadas por la EPA y otros dispositivos con emisiones de 7,5g/h o menos que estén aprobados por el departamento de salud¹³⁶.
 - Alaska: La instalación o reinstalación está restringido solo para dispositivos certificados EPA y luego revisados y aceptados por el departamento¹³⁷.
- Uso de dispositivos existentes

¹³¹ Washoe County (NV) Health District Regs. §040.051(E)(3).

¹³² City of Portola (CA) Mun. Code §15.10.030(A)(1). EPA-certified is defined as “any wood burning heater with a Phase II certification or a more stringent certification as currently enforced in the NSPS.” Id. §15.10.020(8).

¹³³ Utah Admin. Code § R307-302-6.

¹³⁴ Or. Rev. Stat. §468A.495

¹³⁵ Washoe County (NV) Health District Regs. §040.051(C)(2)(a)(2).

¹³⁶ Missoula City-County Air Pollution Rules §§ 9.201–9.202, 9.103(a)–(b); Missoula City-County Department of Health, Wood Stove Installations, <https://www.missoulacounty.us/government/health/health-department/homeenvironment/air-quality/stove-installations>.

¹³⁷ 18 Ak. Admin. Code §50.077(a),(c).<https://dec.alaska.gov/air/burnwise/regulations>

Esta medida da resultados más inmediatos que un cambio de dispositivos a largo plazo. La idea es regular el uso de dispositivos a leña ya existentes:

- Prohibir el uso o exigir la eliminación de artefactos que no cumplan con la norma.
 - Alaska: La fecha límite para retirar estufas no certificadas es hasta el 31 de diciembre de 2024. Además de retirar dispositivos con más de 25 años si emiten más de 2,0 g/h¹³⁸.
 - Washington: Puget Sound Clean Air Agency¹³⁹ exige que los usuarios que no cumplan con estufas certificadas con las emisiones límites antiguas de MP_{2.5} desechen los dispositivos.
 - Montana: En Lincoln se prohibió el uso de estufas de leña. Solo se otorgan permisos para la instalación de estufas a pellet u otros que estén certificados¹⁴⁰. Esta medida también fue adoptada por la ciudad de Libby¹⁴¹.
 - California: El condado de Marín prohibió el uso de cualquier calentador de leña que no esté certificado por la EPA y exigen que las estufas que no cumplan con las normas sean retiradas o dejen de utilizarse¹⁴².
 - Puget Sound y el condado de Marín ofrecen eximición para hogares que no pueden tener otra fuente de calefacción.
- Restringir el uso de dispositivos durante períodos de mala calidad del aire. Una de las medidas más implementadas es la retracción cuando está afectada la calidad del aire. a través de restricciones designadas, como restricción de un tipo de dispositivo o No poder usar dispositivos de leña, o restricción en el uso.
- Establecer estándares de desempeño para el humo de leña emitido por estufas. Establecer estándares de desempeño aplicados al humo que se libera de una chimenea durante la quema de leña. El aumento de las emisiones visibles puede deberse a calentadores de leña más antiguos o a cualquier dispositivo de leña que no se ocupe de forma correcta¹⁴³. Hay dos tipos de políticas para los estándares de desempeño:
 - Límites de la calidad de aire: En términos de opacidad, emisiones visibles o impactos nocivos

¹³⁸ 18 Ak. Admin. Code §50.077(l),(n).

¹³⁹ <https://pscleanair.gov/>

¹⁴⁰ Lincoln County (MT) Air Pollution Regs. §§75.1.204(1), .205, .203(5),(6).

¹⁴¹ City of Libby (MT) Mun. Code §§8.12.070 -.140

¹⁴² Marin County (CA) Mun. Code §19.08.100.

¹⁴³ <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/WoodsmokeOR.pdf>



- Límites cuantitativos de opacidad: Se establece como un porcentaje de vista oscurecida por una columna de humo. Para algunos lugares es de 20%¹⁴⁴, 30%¹⁴⁵ o hasta 40%¹⁴⁶, promediada durante 6 minutos. La medición de opacidad es a través del Método 9 de la EPA.
- Norma de emisiones visibles: Incluye emisiones visibles que cruzan a otra propiedad. Distintos estados de Estados Unidos cuentan con una norma estatal de calidad de aire como New York, Maine, Alaska, entre otros. Utilizan el Método 22 de la EPA, que es una técnica cualitativa que verifica solo la presencia o la ausencia de emisiones visibles, ni necesita que el observador sea alguien verificado¹⁴⁷.
- Impacto de las emisiones de humo: Prohibición amplia de las emisiones al aire que causan lesiones o daños. New York cuenta con una norma sobre la prohibición de provocar emisiones contaminantes perjudiciales para la vida en general o el disfrute de esta¹⁴⁸.
- Normas de molestia: formuladas en términos generales o con referencia específica a la contaminación del aire o al humo de leña. Hay dos tipos de molestias: las privadas, que son acciones que invaden el uso de la propiedad y su disfrute por parte de un tercero, y las públicas, que son referentes a un tercero.
- Establecer prácticas operativas requeridas para los dispositivos

El cómo se utiliza el dispositivo es un factor clave para la reducción de emisiones de contaminantes provenientes del humo de la leña

- Requerir prácticas operativas adecuadas
 - Políticas de calidad de aire: Las reglas de la EPA incluyen un requisito general de las prácticas adecuadas de los dispositivos que incluyen la instalación u operación de una estufa a partir de sus manuales dados por el proveedor e incluyendo

¹⁴⁴ <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/WoodsmokeOR.pdf>

¹⁴⁵ N.M. Admin. Code §20.11.22.15

¹⁴⁶ Missoula (MT) City-County Air Pollution Rules cap.9.104

¹⁴⁷ Método 22 de la EPA: Determinación visual de emisiones fugitivas. <https://www.epa.gov/emc/method-22-visual-determination-fugitive-emissions>.

¹⁴⁸ Reglas y regulaciones del Código de Nueva York. §211.1

únicamente el combustible para la cual se certificó¹⁴⁹. Por lo tanto, se exige que las estufas sean vendidas con sus respectivos manuales de usuario, enseñando la operación y mantenimiento adecuado, incluyendo la minimización de emisiones. También algunos estados prohíben la modificación de las estufas.

- Restringir qué materiales pueden utilizarse para la quema en el dispositivo: Las reglas EPA contienen una lista de elementos prohibidos para la quema en estufas a leña reguladas, incluidas la basura, desechos de jardín, residuos de construcción, materiales con plástico, entre otros. También se incluye la madera seca con un 20% o más de humedad o cualquier otro material con el que no haya hecho la certificación¹⁵⁰.

- Información y educación

La educación sobre técnicas de combustión de leña es clave para la disminución de emisiones. Los estados de Washington y el condado de Marín han promulgado leyes que exigen y/o financian programas educativos sobre combustión de leña¹⁵¹. Respecto a este punto se han implementado las políticas de información para compradores y propietarios de equipos durante la transferencia de bienes residenciales, ventas e instalaciones de las estufas y ventas de madera.

- Asistencia financiera

Se han priorizado los incentivos financieros para reemplazar las estufas de leña por otros dispositivos de menor emisión como las estufas a pellet u otros aparatos de calefacción. Estos programas de asistencia pública abordan específicamente los dispositivos de combustión a leña y financiar actividades, apoyando el reemplazo de calefactores a leña o relacionada a emisiones.

- Desarrollo de programa de financiación para reducir emisiones
 - Reemplazo de estufa de leña por equipos más eficientes y limpios: un punto clave es decidir qué tipos de dispositivos de calefacción de reemplazo son elegibles para recibir financiamiento. Comúnmente se financian calentadores de leña y de pellet nuevos certificados, aunque la EPA recomienda considerar tanto alternativas de madera como

¹⁴⁹ La norma establece la información que debe proporcionarse en el manual del propietario. 40 CFR 60.536 (e) y (g)

¹⁵⁰ 40 CFR 60.532(f)

¹⁵¹ Condado de Marin (CA) Mun. Código §19.08.050 , Wash. §70a.15.3620; Washington.

- sin madera, como estufas de gas natural, propano, bombas de calor y hornos eléctricos o a gas¹⁵².
- Mejoras prácticas de combustión de leña, como proporcionar medidores de humedad o subsidiar la compra de madera curada: La agencia regional de contaminación del aire de Lane en Oregón ha apoyado un programa comunitario de leña en Oakridge, donde se vende leña asequible y bien curada a hogares con dificultades económicas y el 90% de sus ventas va dirigido a personas de bajos ingresos, personas con capacidades diferentes o adultos mayores¹⁵³.
 - Fondos estatales dedicados a reducción de emisiones: Un informe de Oregón de 2016 señaló que la experiencia del estado hasta la fecha con el cambio de estufas de leña muestra que se trata de un esfuerzo de varios años que requiere financiación sostenida, proporcionando una continuidad para que las comunidades sepan que habrá una fuente de financiación de varios años para realizar cambios¹⁵⁴.
 - Aprovechar los programas de financiamiento existentes
 - Ley federal del aire limpio: La EPA brinda subvenciones para mejorar el aire bajo la ley de aire limpio. Las subvenciones autorizadas bajo las secciones 103 y 105 de la ley han apoyado el cambio de estufas a leña por un modelo certificado por la EPA y obtenga más calor y menos contaminación mientras quema menos madera.
 - El humo de leña residencial aporta un 6% (420.000 toneladas) de la cantidad total de MP_{2,5} emitida en Estados Unidos por año. Este valor puede aumentar en algunos sectores.
 - Quemar madera limpia, seca y curada.
 - Retirar periódicamente las cenizas de la estufa de leña y conservarla afuera pero no junto con la madera¹⁵⁵.
 - Modernización energéticas/climatización: La mayor fuente de financiación para la eficiencia energética de los hogares son los programas de asistencia para la climatización (WAP) a cargo del departamento de energía de EE. UU, el cual da subvención para aumentar la eficiencia energética para personas de bajos ingresos, reducir gastos totales

152

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/howtoimplementawoodstovechangeout.pdf>

153 <https://oakridgeair.org/blog/lane-regional-air-protection-agency-secures-an-additional-27-million-in-grant-funding-for-oakridge-air>

154 <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/WoodsmokeOR.pdf>

155 https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/050720_cleanairact_un_resumen_de_la_ley_de_aire_limpio.pdf

residenciales y mejorar la salud y seguridad para personas más vulnerables¹⁵⁶.

- Asistencia de servicios públicos: Programas de asistencia de energía para hogares de bajos ingresos: El programa federal de asistencia energética para hogares de bajos ingresos (LIHEP) distribuye sus fondos para ayudar hogares a cubrir costos energéticos¹⁵⁷.
- Proyectos Ambientales Suplementarios (SEP): Es un proyecto beneficioso que un acusado acepta voluntariamente emprender como parte del acuerdo de un caso de aplicación de la ley ambiental. Generalmente deben reducir el impacto de la infracción en la salud pública o el medio ambiente, y no pueden ser proyectos que el infractor ya esté obligado a realizar. Los SEP no son programas de financiación gubernamental como tal, pero han sido una fuente frecuente de apoyo para los programas de cambio de estufas de leña¹⁵⁸.

14.3.3. Experiencias en el recambio de calefactores de países del extranjero

En el informe de Antecedentes para la actualización de los montos de copago para el Programa de Recambio de Calefactores implementado por el Ministerio de Medio Ambiente¹⁵⁹, se detallan cinco experiencias de programas de recambio de calefactores a nivel internacional.

Woodstove Changeout – Nez Perce Reservation (Craigmont, Idaho, EE. UU.)

Este proyecto fue destinado a las comunidades indígenas Ni Maipú, entre los años 2006 y 2009, y consistió en un recambio de sus artefactos de calefacción, teniendo como objetivo principal bajar las emisiones de MP_{2.5} en el ambiente.

Este recambio se realizó en 16 viviendas. Se instalaron instrumentos de medición de contaminantes al interior de cada una de las viviendas beneficiadas para así levantar información durante un periodo de 48 horas antes y después del recambio.

El recambio de los artefactos fue sin copago por parte de los beneficiarios y los requisitos excluyentes para participar del programa fueron: no ser viviendas de fumadores, ser viviendas habitadas por miembros indígenas, tener niños asmáticos y tener un calefactor no certificado como primera fuente de calefacción.

¹⁵⁶ 42 U.S. Code § 6861

¹⁵⁷ 42 USC §§8622.6, 8624.b.1

¹⁵⁸ <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/WoodsmokeOR.pdf>

¹⁵⁹ Antecedentes para la actualización de los montos de copago para el Programa de Recambio de Calefactores. In-Data y E2biz. Ministerio de Medio Ambiente, 2020.

El resultado de este programa de recambio fue una reducción del 52% de la concentración de MP. Aunque hubo viviendas en las cuales las concentraciones de MP aumentaron, cuya razón fue por la nula educación de cómo usar los nuevos calefactores, junto con la baja calidad de la leña y la quema de otros productos.

Algunos factores importantes a considerar para mejorar el recambio son:

- Una educación y capacitación sobre cómo usar el nuevo calefactor: Capacitaciones periódicas previas y posterior al recambio en cuanto al funcionamiento y cuidado del nuevo artefacto demostraron un impacto alto en los beneficios del nuevo calefactor.
- La calidad de la leña: Factor que puede aplacar los potenciales beneficios del recambio en caso de ser leña con altos índices de humedad, por lo que el solo hecho de cambiar el calefactor no es garantía de reducción de emisiones de MP.
- La sensación de pertenencia: Al no tener un copago asociado al recambio se tiene menos sentido de pertenencia y apego repercutiendo en el cuidado y posible reventa después del periodo de estudio y mediciones.
- Un seguimiento y medición: La implementación acotada hizo posible medir y cuantificar beneficios, para posteriormente ser evaluados y aplicar los cambios a los futuros proyectos.

National Programme on Improved Chulha - India

Este proyecto estuvo operativo entre los años 1984 y 2002, y buscaba el cambio de cocinas de llama abierta a leña llamadas chulha que son utilizadas normalmente en zonas rurales y de escasos recursos. El objetivo principal de este recambio era reducir el uso de leña como combustible, reducir presión en los bosques y su consecuente deforestación y, finalmente, reducir la contaminación. Además, contaba con objetivos secundarios como el reducir la carga de trabajo pesado de las personas que utilizan las chulha y la creación de oportunidades de empleo en el mercado de cocinas de leña eficientes.

Se realizaron cerca de 33 millones de recambios en el período de funcionamiento del NPIC, de un total de casi 120 millones de hogares que utilizaban cocinas a leña artesanales. El recambio de cocinas se realizaba por medio del desembolso de un copago de los beneficiarios, el cual era bajo y accesible. Además, solo era subsidiada la primera cocina entregada a cada hogar, las siguientes que se deseasen se adquirirían al precio normal.

Como parte del programa, también se trabajó en la fabricación local de cocinas a leña, mediante pruebas en laboratorio de un diseño eficiente. Una vez desarrollado tal modelo de cocina, se capacitó a los fabricantes artesanales con tal de que implementaran este nuevo diseño y ellos sean los proveedores de artefactos a los beneficiarios del programa. La creación de capacidades locales a lo largo del programa permitió que se fuera mejorando el diseño inicial de cocinas eficientes, logrando mejorar considerablemente los índices de eficiencia hacia los últimos años de implementación.

Entre los resultados de este programa se encuentran mejoras de hasta un 50% en la reducción de la leña y mejora considerable en el tiempo que dedicaban las personas utilizando las chulha, ya que las nuevas cocinas instaladas poseen una eficiencia de entre un 20% a 35% contra las antiguas que eran menor al 10% (Hanbar & Priyadarshini, 2002).

Posibles análisis para una mejora en la implementación de este proyecto:

- Objetivo y monitoreo del cumplimiento: Objetivos claros desde el inicio y cómo abordarlos ayudaron a la alineación de variadas instituciones para seguir un único objetivo, no obstante tener esto no quiere decir que siempre se podrá medir el grado de cumplimiento o el impacto del proyecto en el objetivo principal.
- Beneficios secundarios: Dentro del desarrollo del proyecto pueden llegar a verse beneficios de objetivos secundarios que pueden llegar incluso a ser más importantes que el de los del objetivo principal, por lo tanto, es importante hacer un monitoreo de los objetivos secundarios.
- Potenciamiento industrial local: Cuando se abarca un proyecto dentro de una cultura con un sistema económico propio, es importante potenciar este ámbito para mantener la cultura y potenciar la industria local.
- Arraigo cultural: Si el componente que se desea cambiar (en este caso las chulhas) es parte de la cultura de un gran porcentaje de la población es mejor enfocarse en mejorar dicho componente, en vez de reemplazarlo.

Provincial Wood Stove Exchange Program – British Columbia, Canadá

Este proyecto fue implementado en la provincia de British Columbia en Canadá. Su objetivo era la reducción de los índices de MP en la zona mediante el recambio de calefactores de leña antiguos e ineficientes.

Entre los años 2008 y 2020 el gobierno provincial desembolsó cerca de 2,5 millones de dólares para la realización de más de 9.000 recambios en diversas localidades y ciudades. Entre aquellos años, el gobierno provincial en promedio entregó como subsidio casi 370 dólares por cada calefactor instalado, lo cual lo hace uno de los programas más eficientes en términos de costo/efectividad a nivel internacional.

El programa provincial entregó recursos tanto a gobiernos locales como a comunidades individuales o agrupaciones de barrios y se enfocó en realizar los recambios en viviendas donde el impacto potencial de reducción de emisiones es mayor, es decir en hogares con artefactos más antiguos, menos eficientes y con altas emisiones.

Los recambios operaron mediante tiendas de retail inscritas, en donde las personas beneficiarias escogieron el artefacto en su tienda preferida y luego, mediante la factura o boleta, se reembolsaron los montos establecidos en cada opción a las que se pudo postular:



- Opción 1: CAD\$400 por recambio desde un calefactor antiguo a un calefactor eléctrico, de pellet, gas natural o propano.
- Opción 2: CAD\$250 por el recambio de un antiguo calefactor a leña por uno nuevo certificado a leña o uno eléctrico.

Como resultado hasta el año 2014 hubo un recambio de cerca de 6.000 calefactores de leña no certificados, lo cual fue por debajo de la meta de 50.000 calefactores. También se destacó que el recambio de calefactor más elegido fue el de artefactos a leña más eficiente seguido por artefactos de gas natural.

Factores importantes para tener en consideración si se implementara este programa:

- El objetivo que se planteó en un inicio, de disminuir las emisiones de MP, no consideró la meta de la cantidad de recambio de calefactores establecida después, por lo que la claridad del objetivo al crear un programa.
- Multi-opción de calefactores: El hecho de dar varias opciones para hacer el recambio beneficia bastante a la hora de implementar el proyecto, el único problema es el stock de los productos.
- Diferenciación de copagos: Tener copagos diferentes para todas las opciones entregadas e incluso aceptar solamente el copago del retiro hace que el proyecto sea más flexible y pueda tener un mayor alcance.
- Participación del retail: Hacer participante al retail y hacerlo la única vía para el proceso de recambio ayuda a descomprimir el engranaje administrativo y aumenta la competencia dentro de la oferta de calefactores.
- Costos de combustibles: En Canadá el gas natural es 2,8 veces más económico que en Chile, mientras que la leña es el doble de costoso comparado con los precios actuales en el país¹⁶⁰.

Wood Heater Replacement Program – Canberra, Australia

El proyecto consiste en mejorar la calidad del aire del Territorio de la capital de Australia (ACT) a través de incentivos a sus residentes para reemplazar los calefactores de leña eficientes o chimeneas abiertas, disminuyendo así las emisiones de MP.

Hasta mayo de 2020 se han realizado cerca de 1.000 recambios de calefactores ineficientes y chimeneas abiertas que operan en base leña (ACT Government, 2020).

En el programa solo se entrega una opción para recambio de calefactores, la cual corresponden a equipos de aire acondicionado inverter, debido a que corresponden a la

¹⁶⁰ <https://es.globalpetrolprices.com>

alternativa más eficiente disponible en el mercado de Canberra. Cabe señalar que los descuentos otorgados por el programa, no se encuentran diferenciados por nivel socioeconómico de los postulantes y tampoco corresponde a un criterio de selección de estos. Los requisitos que deben cumplir los postulantes para optar al recambio tienen relación con:

- Propiedad utilizada exclusivamente para uso residencial.
- Estar reemplazando un calefactor a leña o una chimenea abierta.
- El calefactor a cambiar debe ser el de principal uso en la vivienda.
- Si se recambia un sistema eléctrico este debe ser de una antigüedad mayor al año 2004.

Los recambios se realizan por medio de tiendas del retail adscritas al gobierno del ACT y se entregan descuentos, los cuales son reembolsables por parte de la autoridad, según las siguientes opciones a las que postularon los beneficiarios:

- Descuento 1: AUS\$250 - Retiro o desmantelamiento de un calefactor a leña.
- Descuento 2: AUS\$1.250 - Retiro o desmantelamiento de un calefactor a leña e instalación de un sistema de aire acondicionado inverter central.
- Descuento 3: AUS\$750 - Retiro o desmantelamiento de un calefactor a leña e instalación de un sistema de aire acondicionado Split inverter.
- Descuento 4: AUS\$750 - Retiro o desmantelamiento de un calefactor a leña y actualización de algún sistema de aire acondicionado inverter que se tenga en la vivienda.

Los resultados de este proyecto han sido exitosos y con una alta valoración por parte de la población, se observa una baja sustancial en la concentración de MP en los meses de invierno, aun así, la leña sigue siendo el principal causante de ese indicador (ACT Government, 2020).

La medida internacional destaca que la utilización de equipos de aire acondicionado inverter (calor y frío) o centralizados (1 unidad abastece la vivienda) es eficiente energéticamente, de bajo costo, con nulas emisiones atmosféricas y su versatilidad. Además de la participación de privados en los recambios como un beneficio para el proyecto, ya que se les puede encargar un descuento a los beneficiarios justificado por el aumento de ventas.

Commonwealth Woodstove Change-Out – Massachusetts, Estados Unidos

Este programa tiene como objetivo incentivar a la población del Estado de Massachusetts a cambiar sus calefactores antiguos por unos más modernos con el propósito de ahorrar dinero a los usuarios del programa y reducir el nivel de la huella de carbono.

Hasta mayo de 2020 se han realizado cerca de 2.300 recambios, desde el origen del programa. Aproximadamente, el 50% de los ingresos son recursos destinados para el programa fueron asignados a residentes de bajos ingresos. Lo anterior se explica también por la existencia de descuentos extra a los beneficiarios que sean de escasos recursos. Los cuales tienen un incentivo extra en los descuentos otorgados. Además, los calefactores son adquiridos a través de instaladores locales, los cuales ofrecen los descuentos establecidos por el MassCEC, que fluctúan entre los USD\$500 y USD\$1,750, y para hogares de bajos ingresos entre USD\$2,000 y USD \$3,250. Asimismo, los descuentos son mayores para calefactores que tienen menores emisiones por hora de uso.

Las tecnologías de calefactores que se entregan como opción para el recambio son las siguientes: pellet, calefactor a leña catalítico, calefactor a leña no catalítico y calefactor a leña completamente automático.

El resultado del programa ha sido exitoso dado que ha cumplido su objetivo principal de ahorrar dinero a los usuarios del programa y fomentar el uso de combustibles renovables. También ha logrado un impulso en la industria local en cuanto a suministros de leña y pellet y a la fabricación local de calefactores.

Algunos temas por considerar en este proyecto para su implementación son:

- Diferenciación de incentivos: Incentivos en forma de descuentos permite optimizar los recursos disponibles y también permite hacer un número mayor de recambios, estos incentivos es bueno aplicarlos por nivel socioeconómico, recursos o por calefactor escogido.
- Objetivos: Tener un objetivo fácil de medir es una buena forma para llevar un seguimiento del proyecto y sus resultados.

14.4. Chimeneas y cocinas comercializadas en el mercado nacional.

Otros equipos comercializados son chimeneas y cocinas a leña, los cuales por su potencia y tipo no requieren certificación. Las chimeneas se pueden encontrar en el mercado sobre potencias de 25 (kW) y un par de equipos de potencias cercanas a 9 (kW). En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de modelos de estas características

Tabla 59, Listado de Chimeneas levantado, con el detalle de potencia y eficiencia.

Marca	Energético	Tipo	Modelo	Potencia (kW) max	Eficiencia (%)
Amesti	Leña	Chimenea	Inserto 800	26,0	-
Amesti	Leña	Chimenea	Inserto Bifacial 950	26,5	63,2
Amesti	Leña	Chimenea	Inserto Lux Corner	27,0	71,0
Amesti	Leña	Chimenea	Inserto Trifacial	25,0	62,0
Bosca	Leña	Chimenea	Hergom H02-22	25,0	70,0
Bosca	Leña	Chimenea	Chimenea 1100	30,0	64,5
Bosca	Leña	Chimenea	Chimenea 850	27,0	68,0
Bosca	Leña	Chimenea	Chimenea Freestanding 850	27,0	68,0
Bosca	Leña	Chimenea	Hergom Dero	35,0	72,0
Alcazar	Leña	Chimenea	Bavara	30,5	67,0
Alcazar	Leña	Chimenea	Mont Blanc	26,7	60,1
MCZ	Leña	Chimenea	Boxtherm 80	9,0	82,9
MCZ	Leña	Chimenea	Boxtherm 70	8,6	83,7



Figura 54, Fotos de chimeneas empotradas, a la izquierda modelo Inserto 800 Palladio marca Amesti y a la derecha modelo MONT BLANC marca Alcazar.

Otro tipo de equipo de interés a revisar son las cocinas a leña, las cuales no están dentro de la normativa de emisiones y representan para algunas familias del país, el método principal de calefacción. De esta forma se levantó del mercado nacional un listado de 36 equipos los cuales se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 60, Listado de cocinas a leña levantado, con el detalle de potencia y eficiencia.

Marca	Energético	Tipo	Modelo	Potencia (kW)	Eficiencia (%)
Amesti	Leña	Cocina	Amorossa	6,5	81,0
Amesti	Leña	Cocina	Angelina	9,5	83,0
Amesti	Leña	Cocina	Annetta	11,0	85,0
Amesti	Leña	Cocina	Antonella	9,0	73,0
Amesti	Leña	Cocina	Altima	8,0	83,7
Amesti	Leña	Cocina	Allega vitrox	9,0	80,0
Amesti	Leña	Cocina	Palladio XXL	10,0	-
Amesti	Leña	Cocina	Suprema Inverted	7,0	85,0
Amesti	Leña	Cocina Caldera	Altima	14,0	81,0
Bosca	Leña	Cocina	Hestia 90	9,0	-
Bosca	Leña	Cocina	Hergom L-07 CH	11,1	71,0
Bosca	Leña	Cocina	Hergom Pas II Pulifer	14,0	70,0
Bosca	Leña	Cocina	Hergom Deva II 75	11,0	71,0
Bosca	Leña	Cocina	Optima 500	-	-
Bosca	Leña	Cocina caldera	Hergom L-07 CC	20,2	76,0
Alcazar	Leña	Cocina	Cocina M70	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Cocina M80	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Cocina M90	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Magnum Loza	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Magnum Piedra	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	S800	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	S900	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Thermo Magnum Loza	-	-
Alcazar	Leña	Cocina	Vertical Ofen	-	-
Yunque	Leña	Cocina	80 tradicional	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	72 tradicional	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	70 tradicional	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	90 mueble	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	80 mueble	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	90 tradicional	8,0	70,0

Marca	Energético	Tipo	Modelo	Potencia (kW)	Eficiencia (%)
Yunque	Leña	Cocina	Futura	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	Aurora Visión	8,0	70,0
Yunque	Leña	Cocina	Autral	12,0	85,0
Yunque	Leña	Cocina caldera	Ilaria Hidro	19,7	72,2
Yunque	Leña	Cocina	Autral	12,0	85,0
Yunque	Leña	Cocina	Futura Visión	8,0	70,0

De este levantamiento se observó una gran variedad de cocinas a leña comercializadas en el mercado nacional las cuales van desde potencias de 6,5 (kW) a 20,2 (kW), este último dato es para un equipo cocina/caldera. Como dato adicional, al evaluar la eficiencia de estos equipos respecto a lo exigido en la norma de la EU (del 65% o más), en el mercado chileno se comercializan en el mercado formal equipos con eficiencias del 70% y superiores¹⁶¹¹⁶²¹⁶³(parámetros indicados en los catálogos de los equipos).



Figura 55, Fotos de cocina a leña, a la izquierda el modelo 80 tradicional marca Yunque y a la derecha el modelo S800 marca Alcázar.

¹⁶¹ <https://www.bosca.cl/cocinas/cocinas-a-lena>

¹⁶² <https://www.amesti.cl/content/49-cocinas-a-lena>

¹⁶³ <http://somos.yunque.cl/productos.html>

14.5. Mantenciones que se deben realizar a los calefactores.

14.5.1. Estufas a leña

Tanto Amesti como Bosca, en los respectivos manuales de sus modelos de estufas certificadas, hacen hincapié en tres secciones de limpieza para sus estufas a leña, estas son: limpieza o remoción de cenizas, limpieza de cañón, y limpieza del vidrio.

Para una óptima remoción de cenizas, primeramente, Bosca recomienda hacerlo diariamente o cada dos días, mientras que Amesti le pide al usuario que estime el nivel acumulado unos 2 cm bajo el borde inferior de la puerta. Ambos instruyen al usuario a hacer una limpieza con ayuda de un instrumento como una pala o herramienta a fin para vaciarlas en el cenicero y luego sacarlas al exterior, en un lugar seguro.

Hacen hincapié en esperar más de 36 horas luego del encendido, tiempo para que las brasas estén apagadas y la estufa esté fría, como también dejar una cama de cenizas para proteger el fondo de la caja del fuego, facilitar la acumulación de brasas y labores de recarga.

La limpieza de cañón es importante ya que se forma creosota, la cual es inflamable bajo ciertas condiciones y es producida por la combustión de leña con alto poder de humedad y/o por la poca entrada de aire, y se deposita en la cámara de combustión y las paredes interiores de los cañones. Esto produce una obstrucción, una mala combustión y por ende un mal funcionamiento de la estufa.

Ambos establecen el modo de limpieza a través de instrucciones claras en sus manuales, además de las herramientas a utilizar y el desmonte del templador para la limpieza. Además de poner explícitamente que debe usarse solo leña seca. Bosca, además estima que la limpieza debe hacerse una vez al año, si se utiliza leña seca o de 15 a 20 días si se utiliza una leña verde o con más de un 20% de humedad. También recomienda una vigilancia en caso de inflamación del cañón y cómo evitarla, además de que la limpieza la haga un técnico, pero aun así puede ser realizada por el usuario siguiendo su instructivo.

Para el cuidado del vidrio y evitar las manchas del cristal se recomienda que se utilice leña seca, ya que leña con alto contenido de humedad crea estas manchas, al igual que, en el caso de Bosca, mantener el Control de Aire Primario en mínimo y para Amesti, el cerrar mal la puerta de la estufa. Para ambos equipos se recomienda una limpieza del vidrio sin utilizar elementos abrasivos.

El manual para la estufa a leña Amesti también explica cuándo se deben reemplazar ciertas piezas de la estufa:

- **Templador:** Debe ser reemplazado cuando presente deterioro. En el caso del Templador de Acero cuando se encuentre fundido y en el caso del Templador Mineral Bioecocalórico, cuando se encuentre quebrado.

- **Sellos de puerta y vidrio (Rodón y Cinta):** Estas deben ser reemplazadas cuando la empaquetadura esté gastada, deshilachada o fuera de posición.
- **Ladrillos refractarios, ladrillos mineral o panel mineral:** Estos deben ser reemplazados en el caso que se encuentren quebrados.
- **Vidrio:** Este debe ser reemplazado en caso de trizaduras o posibles roturas por golpe.

Y además recomienda registrar un cuadro de Registro de mantenciones que viene incluido en el manual y es necesario para hacer efectiva la garantía del producto.

14.5.2. Estufas a pellet

Los manuales estudiados en esta sección son de las estufas certificadas a Pellet de Alcázar, Amesti, Bosca, Ravelli y Toyotomi.

Para una limpieza y mantención del equipo es importante que la estufa esté fría apagada y fría. Un punto en común en los manuales es la limpieza del quemador. Para algunos modelos se recomienda una limpieza diaria, ya que el ventilador enciende la combustión a alta velocidad una vez cada hora para quemar los restos de pellet sobrantes y hacer la combustión fuera del brasero, como se señala en la estufa P1500 de Alcázar, a pesar de eso es importante que cada 10 sacos de 15 kg de pellet se realice una limpieza del brasero. Otras empresas recalcan que esta operación dependerá del tipo de pellet utilizado y la frecuencia con la que se usa, mientras otras recomiendan la limpieza del brasero a diario, sin la necesidad de sacarlo de su lugar. El brasero cuenta con una serie de agujeros en el fondo y los agujeros que proporcionan aire a la combustión para los pellets. La idea es retirar, si es necesario y posible, el brasero y asegurarse de la limpieza de los agujeros, quitando todas las cenizas y la escoria, quedando los agujeros abiertos. Para ello se puede ayudar con una aspiradora, al igual que para la limpieza al interior del soporte del brasero. Luego se dan las instrucciones para volver a posicionarlo de manera segura.

Para la limpieza del vidrio, el cual se ensucia dependiendo de la calidad del pellet, se recomienda realizarla con un paño húmedo, paño suave o toalla de papel, cada 1-2 días. Toyotomi tiene instalado un vidrio autolimpiante, por lo que mientras está en funcionamiento una capa de aire se desplaza a lo largo de la superficie alejando las cenizas y suciedad del vidrio, pero aun así es necesaria una limpieza, aunque menos frecuente.

Para la extracción y limpieza de cenizas se recomienda colocarlas en un recipiente metálico cerrado, no combustible, en espera de su eliminación final. Para estufas con cajón de cenizas se debe retirar, vaciar y limpiar el área alrededor del cenicero. Por otro lado, para estufas que no tiene cajón cenicero, solo se debe aspirar con una herramienta especializada para ello, con la precaución de que las cenizas estén bien apagadas.



En la limpieza a la cámara de combustión, por parte del usuario, solo se especifica cómo realizarla en el manual de Toyotomi y Ravelli, mientras que Amesti solo recomienda aspirar la cámara de combustión en general. Ravelli y Toyotomi detallan el paso a paso para esta limpieza, pasando por aspirar las cenizas de la cámara, la limpieza del depósito de pellet y finalmente cepillado y aspirando la parte inferior y superior de cámara de combustión. Toyotomi establece un protocolo más específico para esta sección y también recomienda la limpieza una vez al mes.

La limpieza de la salida de humo, el ventilador de salida de humo, el ventilador de combustión y la tubería, se recomiendan de forma anual. En los manuales se aconseja la limpieza con un cepillo o aspiradora. En el caso de los tubos se recomienda un rascador y una limpieza frecuente. Los manuales traen las indicaciones para la correcta limpieza de estos instrumentos.

Amesti y Toyotomi proponen una limpieza al final de la estación, cuando la estufa ya no se utiliza, de forma cuidadosa y general. Toyotomi también da consejos sobre la limpieza de superficies y piezas de metal con un paño húmedo o seco.

Bosca, a diferencia de los otros manuales, necesita limpieza de los deflectores según el modelo de estufa de manera mensual. Para ello da instrucciones detalladas para realizar la limpieza correspondiente.

Alcázar establece en el manual de sus equipos la limpieza requerida en función del número de bolsas quemadas, la cual variará dependiendo de la calidad y cantidad del pellet:

- Quema de Pellet = 10 bolsas
- Cajón de cenizas = 50 bolsas
- Ventilador de combustión = 100 bolsas
- Tubo ventilación = 100 bolsas

Amesti aconseja un mantenimiento a cargo de un técnico o instalador Amesti y de manera anual:

- Limpieza cuidadosa de la cámara de combustión.
- Limpieza e inspección del conducto de escape de humos.
- Control de la estanqueidad de las juntas.
- Limpieza de los mecanismos y de las piezas en movimiento (motores y ventiladores).
- Control de la parte eléctrica y de los componentes electrónicos.

Ravelli por su parte también aconseja un mantenimiento programado, para cada temporada, realizado por personal del centro de asistencia autorizado:

- Limpieza a fondo de la cámara de combustión.
- Junta de la puerta.
- Tubo.

- Conducto de humos.

Toyotomi también promueve el mantenimiento anual a cargo de personal cualificado:

- Limpieza cuidadosa de la cámara de combustión.
- Limpieza e inspección del conducto de escape de humos.
- Control de la estanqueidad de las guarniciones.
- Limpieza de los mecanismos y de las piezas en movimiento (motores y ventiladores);
- Control de la parte eléctrica y de los componentes electrónicos.

Y también en cada estación antes del encendido:

- Limpieza general interna y externa.
- Limpieza cuidadosa de los tubos de intercambio.
- Limpieza cuidadosa y desincrustación del crisol y del compartimiento correspondiente.
- Limpieza de motores.
- Limpieza del canal de humos (sustitución de las guarniciones en los tubos) y del compartimiento del ventilador de extracción de humos.
- Limpieza del tubito de silicona conectado al presostato.
- Limpieza, inspección y desincrustación del compartimiento de la resistencia de encendido, sustitución de la misma si fuera necesario.
- Limpieza/control del display.
- Inspección visual de los cables eléctricos, de las conexiones y del cable de alimentación.
- Limpieza del depósito de pellet y control de holguras del grupo cóclea-motorreductor.
- Sustitución de la guarnición de la puerta de combustión.
- Prueba funcional, carga de la cóclea, encendido, funcionamiento durante 10 minutos y apagado.

14.6. Importaciones de artefactos a leña y pellet.

Mediante el análisis del registro de importaciones de los últimos cinco años (entre 2018 y 2022), es posible cuantificar el ingreso al país de equipos a leña y pellet, quienes son sus principales importadores, la evolución de las importaciones y el país de procedencia de los equipos.



Para realizar este análisis se utilizaron los siguientes códigos arancelarios para filtrar las búsquedas¹⁶⁴:

- Para Estufas a leña:
 - 73218910: Estufas a leña. Este código era válido para las importaciones antes de 2022.
 - 73218911: Estufas a leña de potencia igual o inferior a 25 kW. Este código es válido a partir de 2022.
 - 73218919: Estufas a leña de potencia superior a 25 kW. Este código es válido a partir de 2022.
- Para estufas a pellet:
 - 73218920: Estufas a pellet. Este código era válido para las importaciones antes de 2022.
 - 73218921: Estufas a pellet de potencia igual o inferior a 25 kW. Este código es válido a partir de 2022.
 - 73218929: Estufas a pellet de potencia superior a 25 kW. Este código es válido a partir de 2022.
- Cocinas a leña: 73211910, para cocinas a combustibles sólidos.

Es importante mencionar que estos códigos no siempre indican correctamente el producto importado, entre las importaciones pueden haber repuestos, partes, otros equipos similares (por ejemplo, fogones de exterior), entre otro. Así como también hacer referencia a otro artefacto, por ejemplo, en importaciones a priori de estufas a leña algunos productos son cocinas a leña o estufas a pellet, de forma inversa en importaciones a priori de estufas a pellet, algunos productos son estufas a leña. Es por este motivo que fue necesario depurar la base de datos para poder trabajarla.

14.6.1. Importaciones de estufas a pellet

En el mercado nacional los equipos a pellet son importados por las empresas que los comercializan, estos equipos provienen principalmente de Italia y China, con un 48% y 47% del total en los últimos cinco años, como se puede observar en la Figura 56. Por otro lado, las empresas que traen estos equipos y que son posibles de trazar en el registro de importaciones, fueron mayormente en estos cinco años: Alcázar, Cosmoplas, Amesti, 2D electrónica, Promasa, Anwo, Toyotomi, entre otras.

164

País de origen de las estufas a pellet, últimos cinco años

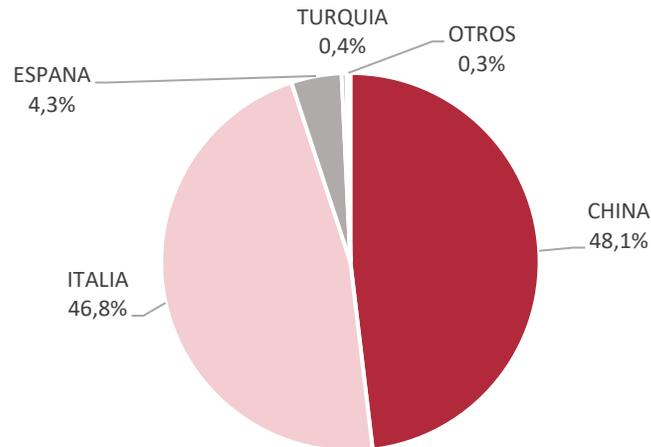


Figura 56, Distribución del país de origen de las estufas a pellet importadas en los últimos cinco años.

La cantidad aproximada de equipos a pellet ingresados en los últimos cinco años fue de cerca de 105.000 unidades, lo que corresponde a un promedio de 21.000 estufas importadas al año. En la Figura 57 se muestra la evolución de las importaciones de estufas a pellet, donde se observó que en el año 2022 hubo una baja, posiblemente atribuida a los efectos de la pandemia en las importaciones, sin embargo, no se ven diferencias apreciables en la cantidad de equipos importados por año, indicando que es un mercado regular y de ventas constantes.

Cabe mencionar las importaciones de equipo termoestufas a pellet, las cuales han sido de cerca de 2.300 unidades en estos cinco años, representado un 2,2% del total de equipos a pellet importados.

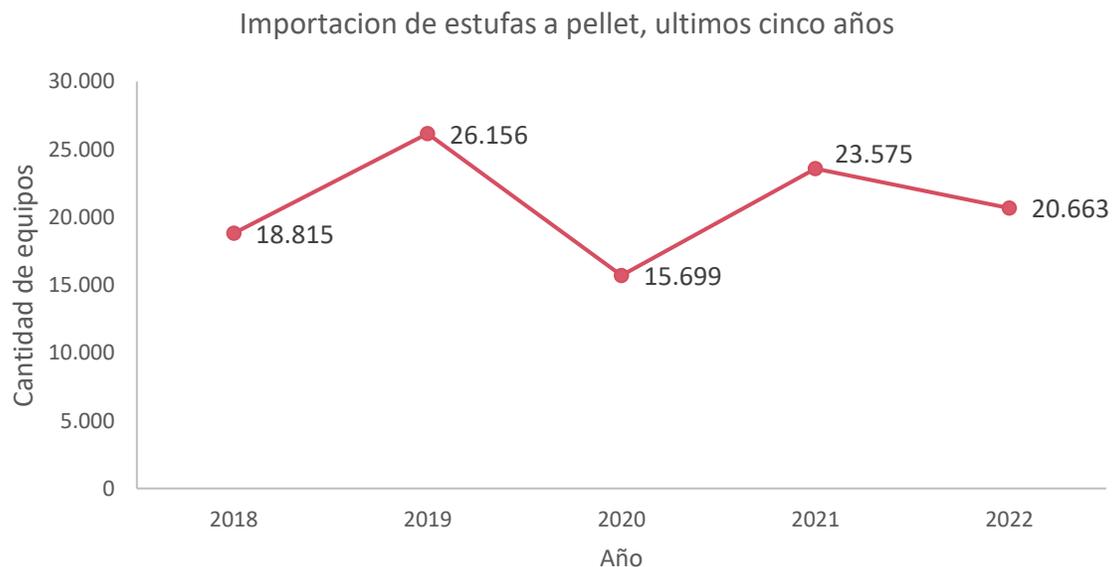


Figura 57, Evolución de las importaciones de estufas a pellet, en los últimos cinco años.

14.6.2. Importaciones de equipos a leña

Las importaciones de equipos a leña son significativamente menores a las de pellet, correspondiente en su mayoría de equipos que no requieren certificación, cómo estufas de altas potencias, chimeneas y cocinas a leña.

Las importaciones de estufas a leña levantadas son de cerca de 222 unidades, de chimeneas a leña de cerca de 100 unidades, mientras que para cocinas a leña la suma asciende a cerca de 32.800 unidades en estos últimos cinco años, aproximadamente 6.500 equipos al año, de los datos fue posible notar un aumento en la cantidad de equipos importados en el año 2021 y 2022. De este dato es importante mencionar que los calefactores a leña importados corresponden a equipos de potencias altas que no requieren certificación y equipos del modelo xeoos® basic natur, los cuales tienen un costo 5 veces superior al promedio de estufas a leña del mercado.

El país de procedencia principal de las cocinas a leña es Serbia con un 43% del total, seguido de Brasil con un 33% y China con un 21%, como se observa en la Figura 58.

Las principales empresas trazadas que importan cocinas a leña son Alcázar, Amesti, Bosca, Yunque, entre otras. Es importante resaltar que este último dato ya no es publicado por la aduana y solo es posible levantarlo con empresas que trazan las importaciones, existiendo una gran parte de importaciones que no es posible atribuir a una empresa.

País de origen de las cocinas a leña, últimos 5 años

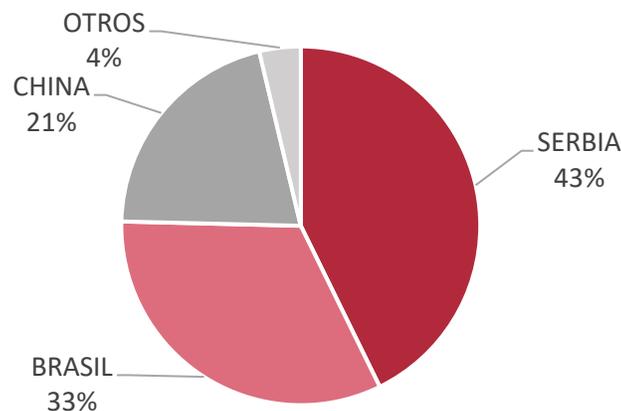


Figura 58, Distribución del país de origen de las cocinas a leña importadas en los últimos cinco años.

14.7. Entrevistas actores claves

Para contar con una visión del mercado y de la aplicación de la norma y el proceso de certificación, se realizaron un par de entrevistas con actores claves del mercado de calefactores, las cuales fueron gestionadas con la ayuda de la contraparte técnica de la Subsecretaría del Ministerio del Medio Ambiente.

Estas fueron realizadas siguiendo una pauta de preguntas pre formuladas, las cuales se utilizaron para motivar la reunión en base a una entrevista semi estructurada, de todas formas, algunas preguntas fueron realizadas de forma espontánea dependiendo del tema abordado en la conversación. Las empresas entrevistadas fueron: Anwo, Alcázar, Cosmoplas y Toyotomi.

Se realizaron consultas diferenciadas en función de si existe fabricación de equipos o si se importan. Los resultados de cada entrevista se desarrollan a continuación:

14.7.1. Entrevista Amesti

Esta entrevista se realizó a personal de Amesti, encargados de la comercialización de sus productos. En la cual se levantaron los siguientes puntos de interés:

- En Amesti se fabrican estufas a leña y se importan estufas o componentes de estufas a pellet (las cuales pueden ser para ensamblar en Chile o el producto armado). Los equipos a pellet son importados principalmente de Italia, China y Corea del Sur.
- Indican que la venta anual de estufas a leña y cocinas a leña es de entre 100.000 a 40.000 equipos al año, donde comentan que las ventas han disminuido en los últimos años, lo cual atribuyen a las restricciones de uso en ciertas zonas y políticas restrictivas para este tipo de equipos.
- Han probado formas nuevas de tecnologías para la reducción de emisiones de sus estufas, como filtros electrostáticos, los cuales les han dado buenos resultados, pero con un uso inadecuado de leña estos no funcionan del todo bien.
- Respecto a los cumplimientos normativos, indican que los equipos que fabrican pueden cumplir con la norma, pero los equipos a pellet que importan no son capaces de cumplir con los requerimientos, por lo que los modifican en Chile, cambiando algunos componentes internos y las entradas de aire para que puedan cumplir con la norma.
- Indican que modificar la cámara de combustión o las entradas de aire de las estufas a leña es complicado, pero que en el caso del pellet es posible regular la entrada de aire por el motor interno.
- Comentan que la norma chilena es una mezcla de los requerimientos de Estados Unidos respecto a emisiones y de la Unión Europea respecto a eficiencia, lo que la

convierte en la norma más estricta (según declaran). Pero que las condiciones respecto a la situación de Chile son distintas, comentan que, en Estados Unidos, hay mayor conciencia del uso de leña seca y que las casas tienen mejor aislamiento térmico.

- En el caso de un cambio en la norma a una que sea más estricta, ven posible cumplirla, pero que las condiciones de laboratorio no reflejan la realidad del país, donde el factor del usuario es relevante.
- Indican que el enfoque debe estar en los combustibles y no en los equipos, que la política apunte a la utilización de estufas a pellet, contemplar en la norma las cocinas a leña y mejorar el aislamiento de las viviendas.
- Comentan la importancia de la existencia de un combustible regulado (leña y pellet), ya que los ensayos que ellos realizan difieren con los del laboratorio certificado, producto de la utilización de combustibles de diferentes características.
- Han notado que la calidad del pellet que se comercializa disminuye en invierno, lo que afecta en el rendimiento de los calefactores. Así como el uso de leña húmeda. Si no existe un estándar para el combustible no es posible estandarizar las emisiones.
- También indican la existencia de vendedores de estufas sin certificar, ellos creen que no han podido realizarla dados los altos costos del proceso.

14.7.2. Entrevista Alcázar

Esta entrevista fue realizada a personal de la empresa Alcázar, de la cual se extraen estos principales puntos:

- Alcázar comercializa principalmente estufas a leña, cocinas a leña y estufas a pellet, los primeros son de fabricación local y las cocinas y estufas a pellet son importadas.
- Comentan que cuando ocurrió un cambio en la norma dejaron de comercializar en el mercado nacional una parte de sus productos, por no poder cumplir con los nuevos límites de emisión, por lo que destinaron las ventas al extranjero.
- Indican que su volumen de venta entre todos los equipos que comercializan es de cerca de 12 mil unidades al año.
- Estiman que la vida útil de los equipos que venden puede ser de sobre los 10 años y con buena mantención pueden llegar hasta los 25 años.
- Comentan que los últimos años se han realizado mejoras al diseño de las cocinas a leña, buscando una mayor optimización de la leña.
- Indican que algunos clientes se han vistos obligados a dejar el pellet y volver a la leña por los altos costos y la escasez de pellet en ciertas épocas del año.
- Señalan que dado el diseño de las cocinas a leña se hace complicado generar mejoras respecto a las emisiones, pero han probado con algunas tecnologías de

filtros que les han dado buenos resultados, mientras no estén saturados. También han participado en estudios con la Universidad de la Frontera, para evaluar el efecto en las emisiones por la modificación del diseño de las cocinas a leña.

- Declaran que parte importante del correcto funcionamiento de los equipos es por parte del usuario final y que el uso de leña húmeda afecta en gran medida al equipo y las emisiones.
- Ellos como empresa venden equipos con el tiraje limitado, pero hay usuarios que modifican esto para hacer durar más la combustión, afectando directamente las emisiones.
- Destacan la importancia de realizar mantenciones a los equipos y que la instalación sea la adecuada.
- Respecto a las certificaciones, señalan que para ellos es costoso realizar el proceso, les sugiere un costo de cerca de 10 millones de pesos certificar cada modelo, lo cual deben realizar una vez al año según la ley.
- Indican que en Alemania se certifica una vez cada modelo y no se debe realizar una nueva certificación hasta que ocurra un cambio en la norma. Donde sugieren que el proceso en Chile debería ser similar, certificando una vez un modelo tipo.
- Comentan también la existencia de un comercio desleal respecto a los equipos no certificados, para ellos como empresa realizar todo de acuerdo con la norma les requiere un costo que otros no realizan.

14.7.3. Entrevista Cosmoplas

Esta entrevista fue realizada a personal del Cosmoplas encargados de la comercialización de equipo a combustión y certificaciones de seguridad. Los principales resultados de esta se muestran a continuación:

- Como empresa venden gran variedad de artefactos, pero referente a equipos que utilicen combustibles sólidos, ellos importan estufas a pellet y calderas a pellet, provenientes de Italia.
- Estos equipos vienen con un documento de certificación europea, que les garantiza que estos puedan pasar las certificaciones chilenas. Al respecto mencionan que no han tenido mayores problemas para importar equipo, todos cumplen con la normativa al momento de la certificación.
- Señala que los productos que importan han mejorado con el tiempo, implementado mejoras en el diseño para la disminución de emisiones y en eficacia energética. Mencionando que tienen previsto importar nuevos modelos, con nuevas mejoras.
- De este tipo de equipos comercializan de entre 1.800 unidades a 1.500 al año, principalmente en Temuco y la zona sur de Chile, en Santiago es cerca del 2% de las ventas.
- Respecto al uso de las estufas, señalan la importancia del usuario en su correcto funcionamiento, dependiendo del tipo de pellet que utilizan, ya que saben de casos



donde se usa pellet de cascara de nuez, o pellet no 100% puro el cual no es adecuado y afecta al equipo.

- Uno de sus equipos debería tener una vida útil de entre 7 y 10 años, con un correcto uso de pellet (ellos trabajan con un fabricante de pellet, pero eso no implica que el usuario final lo utilice) y realizando las mantenciones adecuadas.
- Las principales mantenciones requeridas para estos equipos son, limpieza del brasero, quitar las cenizas generadas en la combustión (cada 20 días) y limpieza de los cañones una vez al año.
- Ellos trabajan principalmente con instaladores y una pequeña parte de las ventas es directamente hacia el usuario final.
- Respecto a las certificaciones, comentan que para ellos esto implica en un gasto que se debe realizar una vez al año, no como la de seguridad que se renueva cuando hay un cambio en la norma. Además de que se debe considerar el traslado de los equipos al laboratorio, lo que aumenta los costos.
- Comentan que la norma debe ser evaluada respecto a la realidad de los equipos que se comercializan en el mercado nacional y que el enfoque debería estar en contar con un combustible certificado, que garantice los resultados esperados ya que han visto diferencias en los ensayos dependiendo del pellet utilizado.
- En el caso de haber un cambio en la norma, indican que esta debería ser paulatina y con un periodo de marcha blanca.

14.7.4. Entrevista Toyotomi

Esta entrevista fue realizada a gerentes de Toyotomi, del área de estufas a pellet. Los resultados de esta entrevista se resumen a continuación:

- Dentro de los equipos que comercializan, los referentes a combustibles sólidos con las estufas a pellet, las cuales importan desde Italia.
- El mayor mercado para ellos es en el programa de recambio de calefactores, donde destinan cerca de 4.000 unidades al año, mientras que las ventas a otros clientes son de cerca de 300 unidades al año.
- Desde 2017 han importado equipos a pellet y los cuales no les han presentado problemas al momento de importarlos, todos sus equipos pasan las certificaciones. También indican que trabajan con laboratorios para medir sus equipos y verificar previamente si cumplen con la norma.
- Comentan que los equipos que comercializan no han sufrido grandes cambios en la cámara de combustión y otros componentes internos. Según indican los equipos han recibido mayormente cambios estéticos.
- Mencionan que en el mercado existen gran variedad de pellets, los cuales no dan los mismos resultados a la hora de ser utilizados en las estufas, afectando en algunos casos al funcionamiento de estas, como pellet de cáscara de nuez u otros con mayor cantidad de resina. Esto genera mayor desgaste al equipo y crean más cenizas.

- Respecto a las mantenciones indican que estos equipos al tener componentes electrónicos, les permiten indicar los momentos adecuados para realizar alguna revisión, como por ejemplo un sensor que pasadas 900 horas de uso da la señal para realizar una revisión interna de la cámara de combustión, revisar los sensores y ventiladores.
- Además, indican las mantenciones que se deben realizar periódicamente, como la limpieza de las cenizas, ventiladores y el cañón.
- Al respecto de las certificaciones indican que estas siguiere un costo anual, pero que, mientras la certificación de un modelo sea vigente, pueden importar la cantidad de lotes que deseen y los equipos que queden en stock no requieren renovar la certificación.
- Respecto a la instalación de las estufas, ellos trabajan con instaladores, pero cuando el equipo es vendido directamente al usuario final, es este el que decide con quien realizar la instalación. Dado esto, mencionan que es importante establecer un reglamento o norma para la instalación de los equipos.
- Finalmente indican que la norma actual es estricta y el problema está en el combustible y no en los equipos.

14.7.5. Entrevista Cesmec

Posterior a las entrevistas a los fabricantes e importadores de equipos, se vio necesario contactar a otro principal actor del mercado, en este caso a Cesmec, quienes son a septiembre de 2023 el único laboratorio certificado por el INN para realizar los ensayos para equipos de leña y pellet.

Los principales antecedentes recabados de la entrevista realizada fueron los siguientes:

- Cesmec como laboratorio realiza los ensayos establecidos en los protocolos PC200 de seguridad, PC200-1 de eficiencia energética y PC200-2 de emisiones de MP para equipos a leña y los protocolos PC201 de seguridad, PC201-1 de eficiencia energética y PC201-2 de emisiones de MP de equipos a pellet.
- Los ensayos que realizan están basados en los establecidos por la EPA.
- Las mediciones para equipos a leña y pellet son realizadas siguiendo lo establecido para cada energético, en el caso de los equipos a leña, se realizan las mediciones hasta completar la combustión de la leña suministrada, mientras que en para el pellet se realiza en tandas de 2 horas.
- Cada equipo a leña medido es sometido a distintas pruebas de rendimiento, con el tiraje de aire completamente cerrado, completamente abierto y dos disposiciones intermedias, mientras que para equipos a pellet se realizan siguiendo los controladores de consumo del manual. Posteriormente se realiza un promedio ponderado de los resultados a distintos rendimientos para determinar la tasa de emisiones del calefactor.



- La instalación del equipo para realizar las mediciones se sigue mediante lo indicado en los protocolos indicados en el primer punto.
- Al momento de la certificación se verifica que en los manuales esté la información de las condiciones de instalación y medidas de seguridad. La responsabilidad de la correcta instalación es dada al fabricante/instalador, sin realizar medición en base a un protocolo que las respalde.
- El proceso de medición de un equipo puede durar en promedio 8 a 10 días, donde se realizan los ensayos de seguridad, eficiencia y emisiones de MP.
- Cada certificación de equipos puede costar entre 90 y 100 UF, lo cual es variable dependiendo de cada caso, ya que las mediciones de MP se deben realizar una vez cada año calendario, mientras que las de seguridad, cuando son equipos importados se deben realizar revisiones de los lotes importados. Por otro lado, a las fábricas nacionales se les realizan auditorias para verificar aspectos de seguridad.
- Comentan que cuando se realizó la actualización de la norma de seguridad, quedaron sin producción un mes a la espera de poder realizar el proceso de certificación con el INN.
- Según indican, no hay factibilidad de implementar los mismos protocolos de medición de MP del método CH-28 para las cocinas a leña, caso contrario con los ensayos de eficiencia y seguridad, que si pueden ser aplicados los mismos de los demás equipos a las cocinas a leña. Por tanto, de incluirse un protocolo de medición de cocinas, se debería diferenciar el método específico para estas.
- Indican que la realización de los ensayos requiere un régimen de calefacción estricto, que solo pueden lograr con el método establecido en la norma, por tanto, ven una dificultad en la utilización de un método realista de uso de leña para medir las emisiones. Sin embargo, no descartan la posibilidad de realizar las mediciones de esta forma, dado el interés de la EPA al normar el uso de este formato de leña realista.
- Respecto a una posible adición de certificación de las cocinas a leña, como empresa cuentan con la factibilidad y las condiciones para realizar las mediciones. Actualmente están montando otro laboratorio para mediciones de estufas que podría ser utilizado para medir las cocinas a leña.

14.7.6. Principales observaciones de las entrevistas

Posterior a las entrevistas se rescataron los siguientes puntos en común o de interés:

- Respecto a los equipos que son fabricados a nivel nacional, algunas empresas han podido modificar sus equipos con tal de cumplir la norma actual. Modificando el diseño de la cámara de combustión y las entradas de aire.
- Los equipos importados no tienen mayores inconvenientes a la hora de cumplir con las normativas actuales, en general son equipos de altos estándares.
- Existe un mercado informal de venta de equipos que no tienen certificación.

- Las cocinas a leña no tienen normativa de emisiones.
- Existe una gran diferencia en los resultados de los ensayos realizados con distintos energéticos, para leña y pellet. Por tanto, se sugiere una mayor regulación respecto al combustible que se comercializa en Chile.
- El factor del usuario es significativo en el correcto uso de los artefactos, por el tipo de energético utilizado (leña húmeda o pellet de mala calidad) y por algunas modificaciones que realizan a las estufas para cambiar las entradas de aire.
- Las certificaciones de los equipos conllevan un gasto no menor para las empresas, siendo en algunos casos restrictivo para ciertos participantes del mercado. Además de que debe realizarse una vez al año, generando un costo constante, sin embargo, una certificación es válida para todos los equipos de un modelo que se importen o fabrique durante ese año.
- También se comentó por parte de los entrevistados que el enfoque no debería ser hacia los equipos si no que a los energéticos. Este aspecto es entendible desde el punto de vista de las empresas que comercializan los productos, ya que esto los afecta directamente.

14.8. Desafíos del mercado de calefactores a leña y pellets

En base a la información levantada en las distintas entrevistas a proveedores de equipos y a la Asociación Chilena de Biomasa (AChBiom), junto con levantamiento de información secundaria, se han estimado los principales desafíos del mercado de calefactores a leña y pellets de acuerdo con los siguientes ámbitos:

- Disponibilidad y Precio de los Energéticos
- Costo de Equipos
- Tendencias de la demanda de equipos

Disponibilidad y Precio de los Energéticos:

En relación con este punto, para el caso de pellets, de acuerdo con la información levantada por AChBiom, hasta antes de la pandemia, la producción de este energético crecía del orden de 20% anual. A partir de ese año, se han producido 2 quiebres de stock; el primero durante el año 2020, explicado por la mayor demanda de calefacción residencial debido a la pandemia, lo que generó mayor demanda que producción. El segundo quiebre se produjo el 2022, como resultado de los buenos precios de la electricidad, lo que llevó a las plantas térmicas de las empresas forestales, a aumentar la demanda de aserrín y viruta de los aserraderos de sus zonas, materia prima para la producción de pellets. En este sentido, de acuerdo con AChBiom, ha existido un trabajo de mejoras tecnológicas dentro de los productores de pellets, que les permitirá no depender de los subproductos forestales (viruta, aserrín), ya que, a través de la incorporación de secadores y molienda, es posible que un porcentaje importante a futuro pueda ser producido a partir de rollizos propios o de

terceros. Esto último, sin embargo, podría traer un incremento en el precio del pellet, que en la actualidad está entre los 220 y 270 (\$/kg).

Sin embargo, la producción de pellets, a pesar de los quiebres de stock, se ha mantenido creciendo a tasas de 20% en los últimos años, llegando a una producción de 220.000 (t/año) el 2022 donde el principal uso es residencial. Esto se observa en la siguiente figura:

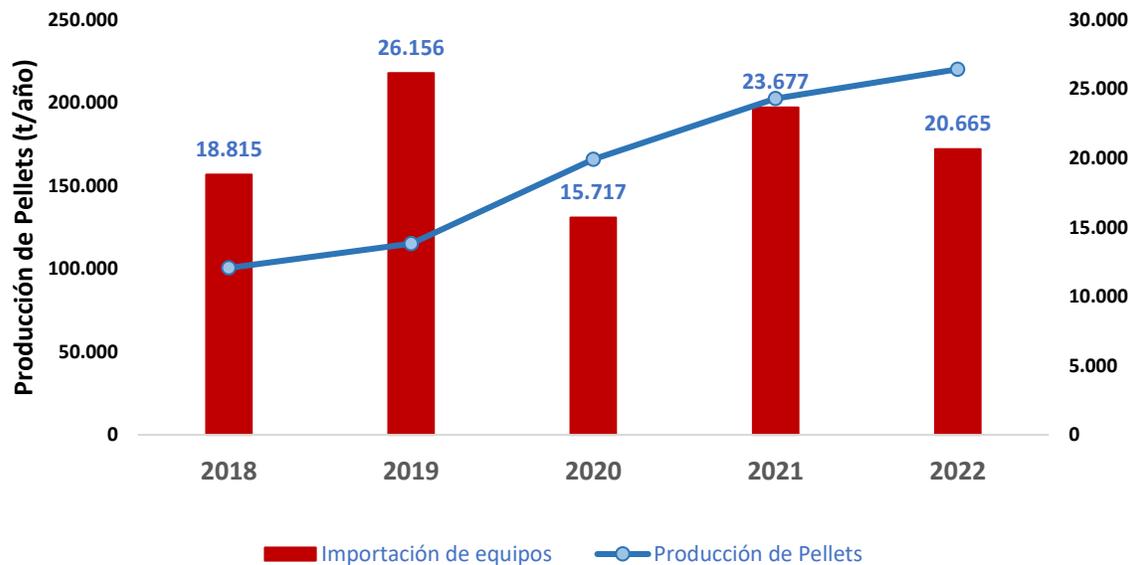


Figura 59. Producción nacional de pellets e importación de calefactores a pellets. Fuente: elaboración propia a base de datos del registro de importaciones y de AChBiom.

Otro desafío es la ley de biocombustibles, que en el caso del pellet requerirá una certificación, que aumentará su precio de venta.

En el caso de la leña, la situación es similar, sin embargo, el desafío es mayor dada la necesidad de fiscalización requerida para la certificación, lo que requiere capacidades y presupuestos considerables en los próximos años. Adicionalmente, esto también incidirá en un mayor precio de venta de la leña, el que requerirá un proceso de certificación. Una solución a esto, son la masificación de los centros de secado, que permitirían simplificar y centralizar la labor de certificar la humedad.

Costo de Equipos:

De las diversas entrevistas a fabricantes e importadores, se observa que el proceso de certificación (material particulado, eficiencia), es la mayor preocupación respecto al costo de los equipos. En general se percibe como un proceso costoso, que es cumplido por todos los proveedores entrevistados, pero que se estima existe un porcentaje relevante de pequeños fabricantes que no lo lleva a cabo, dado su alto costo que se amortiza con volúmenes importantes de equipos (más de 100 equipos). Esto es una barrera de entrada, y la necesidad que sea anual, es visto como un desincentivo.

Adicionalmente en la actualidad solo existe un laboratorio para los ensayos de material particulado y eficiencia térmica (hasta hace un tiempo había dos, pero cerró su área de este tipo de ensayos). Esto podría generar problemas de falta de competencia y precios elevados de ensayos, de acuerdo con los importadores entrevistados.

Tendencias de la demanda de equipos

De acuerdo con los datos de las importaciones de calefactores a pellets, se observa que se mantienen las cantidades, y de acuerdo con AChBiom, se espera un incremento en los próximos años, como resultado de una esperada estabilización del stock de pellets. Al 2021 se estima, de acuerdo con AChBiom, una cantidad de 130.000 viviendas con calefactores a pellets en Chile, que en la actualidad rondaría las 180.000 viviendas, y cuyo ingreso de nuevos equipos está entre 20.000 – 25.000 equipos por año (ver gráfica anterior).

Esta cantidad podría aumentar, si se masifica en los sectores donde está poco presente, como el sector industrial, comercial e institucional. En la actualidad, el 95% del consumo de pellets es del sector residencial.

A diferencia de los calefactores a pellets, los calefactores a leña muestran un descenso en sus ventas anuales, las que se estiman del orden de 60.000 equipos año¹⁶⁵ actualmente, el peak es del orden de 100.000 equipos/año hace algunos años atrás. La principal razón mencionada, son las mayores exigencias medioambientales en zonas con PDA vigentes. Si bien de acuerdo con el estudio “Usos finales de la Energía 2008” y “Usos finales de la Energía 2018”, se nota un incremento en las viviendas que declaran usar leña, pasando de 1,6 millones el 2008 a 2 millones el 2018, para el 2022, se observa un estancamiento en 2 millones de viviendas que declaran usar leña, a partir de datos de la encuesta Casen 2022.

Certificación de equipos

En base a distintas entrevistas con actores claves del mercado de fabricantes, importadores, laboratorios y la SEC, se han podido recabar ciertos antecedentes que permiten comprender de mejor manera los desafíos que enfrentan tanto las empresas como los organismos encargados de las mediciones y certificación de equipos, a la hora de que exista una modificación en norma actual de emisiones.

De esta forma, uno de los principales puntos que fueron reiterados sobre los procesos actuales, hacen referencia a los costos asociados a las certificaciones de cada modelo de equipo, lo que conlleva a un desembolso considerable por parte de las empresas que comercializan estos productos. Además de que es necesario para este proceso de revisión

¹⁶⁵ Es más compleja la estimación del mercado de calefactores a leña, ya que son fabricados principalmente en Chile, por fabricantes de diversos tamaños. El valor aquí estimado, viene de declaraciones de fabricantes de equipos

normativa, tener en consideración los efectos que este puede tener sobre empresas con un menor volumen de venta.

Respecto a los procesos en sí, a fecha de elaboración de este documento, solo la empresa Cesmec está certificada por el INN para realizar los ensayos a los equipos de leña y pellet, lo que según diversas fuentes, no ha afectado a los procesos, no son demasiados los requerimientos nuevos de certificación que han recaído sobre ellos, por tanto esto no afecta al flujo de ensayos realizados.

Desde Cesmec y la SEC, se ha mencionado la importancia de que en caso de realizar cambios a la norma, estos deberían ser paulatinos, para no afectar los tiempos internos requeridos para actualizar las certificaciones de los laboratorios con el INN.

14.9. Mejora de diseño para Reducir la Emisión de Partículas en Cocinas a leña utilizadas en Araucanía, Chile.

Un estudio de la Universidad de la Frontera¹⁶⁶ en la Araucanía, publicado en 2021, desarrolla la idea de una mejora en el diseño de cocinas. A través del informe se comparan las emisiones provenientes de la quema de madera de tres cocinas de combustión interna. La diferencia entre ellas radica en el sellado, la forma de la cámara de combustión y las superficies de calefacción, con el fin de optimizar la combustión de biomasa y la energía producida a un bajo costo de fabricación.

Se determinaron niveles de MP, NO_x, CO₂ y CO, y la temperatura de los gases utilizando el método en el capítulo 28 de la norma UNE-EN 12815. La emisión promedio se redujo significativamente al modificar la geometría de la cámara de combustión y la superficie de calefacción de cada estufa, resultando en emisiones de MP de 5 (g/h) en equipos convencionales sin modificar y 2 (g/h) en los equipos mejorados. En cuanto a las emisiones de gases, NO_x tuvo una disminución de 25% y CO de 35%.

Estos antecedentes respaldan que se puede hacer una mejora tecnológica con alto impacto ambiental y bajo costo económico para los fabricantes. Los mejores resultados se obtuvieron con la tercera estufa modificada, la cual se aprecia en la Figura 60. Este modelo es similar al convencional que se encuentra en el mercado nacional, con la diferencia de solo dos mejoras importantes. La primera modificación se encuentra en la cubierta, la cual se encuentra sellada de forma hermética lo que la hace más eficiente, y su otra modificación está en la cámara de combustión, cuya cámara está delimitada por una aleta o deflector

¹⁶⁶ Astete, Robinson & Gutierrez Cáceres, Nicolas & Muñoz-Catalán, Marcela & Mora-Chandía, Tomas. (2021). Direct Improvement in the Combustion Chamber and the Radiant Surface to Reduce the Emission of Particles in Biomass Cooking Stoves Used in Araucanía, Chile.

como se muestra en la Figura 60, reduciendo el área de los gases de escape en un 60% en comparación con las otras dos versiones.

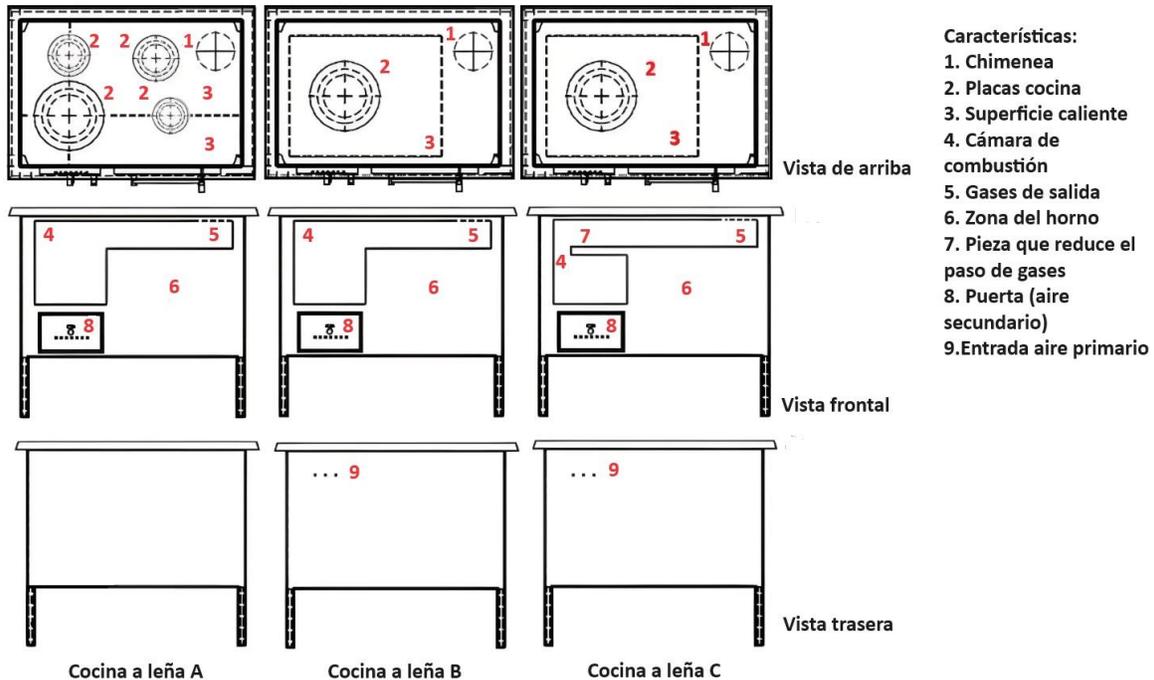


Figura 60, Diagrama de las modificaciones realizadas a las cocinas a leña en el estudio. Fuente: Betancourt Astete, R.; Gutiérrez-Cáceres, N.; Muñoz-Catalán, M.; Mora-Chandía, T. *Direct Improvement in the Combustion Chamber and the Radiant Surface to Reduce the Emission of Particles in Biomass Cooking Stoves Used in Araucanía, Chile*. *Sustainability* 2021, 13, 7205

14.10. Proyección de la calidad de aire por adición de tecnologías.

Para realizar el análisis proyectado de la calidad del aire, se realizó el cálculo respecto de la reducción de las emisiones de contaminantes producto de la aplicación de una medida de reducción por adición de una tecnología de abatimiento. Esta se basa en la utilización de filtros electrostáticos, los cuales han sido probados y comparados en condiciones reales de uso doméstico, instalados en viviendas del sur de Chile. Este estudio llamado “Apoyo Técnico en Piloto de Pruebas de Dispositivos de Abatimiento de Emisiones de Material Particulado (humo) en Calefactores Residenciales a Leña de Coronel” fue realizado por la Universidad de Concepción en el año 2023, contratado por una empresa que nos suministró los resultados de las pruebas, para poder realizar el análisis. La tecnología probada en dicho estudio fue de filtros electrostáticos (de los cuales no podemos indicar marca), esta fue probada en estufas a leña certificadas y en estufas a leña antigua, tipo salamandra y de cámara simple, obteniendo para estas últimas, la mayor reducción en las emisiones dadas las pruebas realizadas, siguiendo el método establecido en la norma chilena.

Las estimaciones de la reducción de emisiones se basan en los resultados de este estudio, considerando un desempeño menor, los cuales se indican en la Tabla 61. Además, se consideró un porcentaje de penetración de la medida a 10 años, en base al criterio del equipo consultor, los cuales fueron definidos para cada zona del país, el detalle se muestra en la Tabla 62.

Tabla 61, Porcentaje de reducción de emisiones por tipo de calefactor con la aplicación de filtros electrostáticos.

Tipo de calefactor	Porcentaje de reducción de emisiones
Calefactor doble cámara/certificado	30%
Estufa Hechiza/Salamandra	60%
Calefactor de cámara simple	40%
Cocinas a leña	50%

Tabla 62, Porcentaje de penetración a 10 años de la implementación de filtros electrostáticos, por zona del país.

	Zona del país	Porcentaje de penetración de la medida
Penetración de la medida 1	Norte	1%
	Centro	5%
	Sur	15%
Penetración de la medida 2	Norte	1%
	Centro	5%
	Sur	25%

De esta forma, la reducción de emisiones para cada tipo de calefactor en base a cada escenario de penetración de la medida se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 63, Reducción de emisiones por efecto de aplicar la medida de filtros electrostáticos, en distintos escenarios de penetración.

	Tipo de Calefactor	Reducción en las emisiones En el horizonte de análisis
Penetración de la medida 1	Calefactor de doble Cámara	2,09%
	Estufa Hechiza	4,31%
	Salamandra	4,25%
	Calefactor de cámara simple	2,67%
	Cocina a leña	3,31%
Penetración de la medida 2	Calefactor de doble Cámara	2,84%
	Estufa Hechiza	5,96%
	Salamandra	5,74%
	Calefactor de cámara simple	3,52%
	Cocina a leña	4,37%

Con estos porcentajes de reducción y penetración de la medida, y en base a los resultados de las emisiones de los calefactores calculadas en el punto anterior y la estimación del parque de calefactores indicada en la Figura 42, se realizó el cálculo para determinar el impacto de la medida en la reducción de emisiones de los contaminantes de la combustión, los cuales se detallan en la

Tabla 64.

Tabla 64, Emisiones de contaminantes a 10 años, en base a implementación de filtros electrostáticos.

	Emisiones de MP _{2,5} como resultado de aplicar filtros electrostáticos (t/año)										
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Línea Base	101.011	97.435	93.860	90.285	86.710	83.134	79.559	75.984	72.409	68.833	65.258
Penetración de la medida 1	101.014	97.176	93.357	89.559	85.781	82.022	78.284	74.566	70.867	67.189	63.531
Penetración de la medida 2	101.014	97.029	93.074	89.150	85.255	81.392	77.558	73.756	69.983	66.241	62.529

Si observamos las emisiones de MP_{2,5} son cerca del 2,6% menos por la aplicación de la medida en el primer escenario de penetración, la cual se ve reflejada en su mayor parte, en el sur de Chile, dada la mayor cantidad de equipos y el supuesto de un mayor nivel de penetración. De esta forma, se realizó un análisis del efecto en la penetración de la medida, específicamente en la zona sur, hasta un 25%. De esto, se calculó una disminución total del MP_{2,5} cercano al 4,2%. El detalle de las emisiones de MP_{2,5} para las estufas que se ven afectadas por la medida, se muestra en la Figura 61.

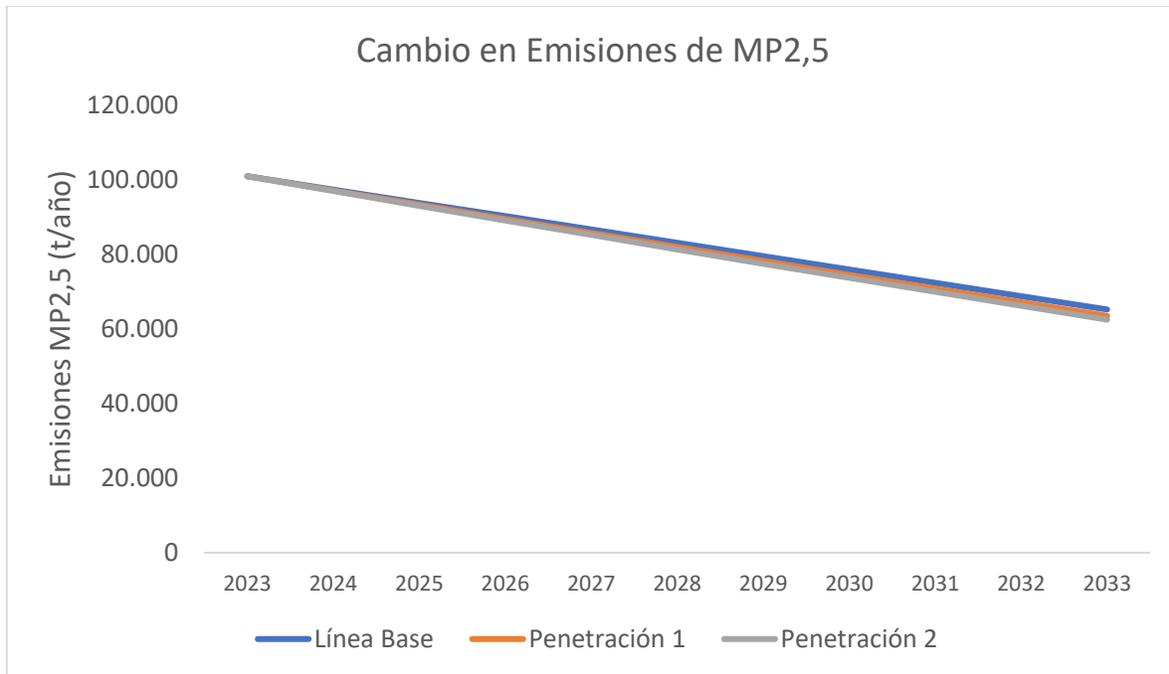


Figura 61, Cambio en las emisiones de $MP_{2,5}$ en toneladas por año, a 10 años para los calefactores que aplica la medida, bajo escenarios de mayor penetración.

De los resultados, se observa que la aplicación de una tecnología de mitigación de emisiones permite una disminución de estas, la cual dependerá de la penetración de la tecnología en las viviendas del país, sin embargo, este tipo de filtros, tienen un costo elevado, cercano al valor del calefactor a leña, y no representa en la práctica, un beneficio económico directo a las familias, lo cual hace que este tipo de medidas tengan una mayor barrera, sin embargo, si este tipo de tecnologías son impulsadas mediante subsidios o programas de empresas privadas o programas del estado, es posible lograr una disminución de las emisiones provenientes de la calefacción a leña.

14.11. Estimación de costos por aplicación de medidas de abatimiento de emisiones.

De acuerdo al cálculo realizado en el capítulo 0, se estimó la reducción de emisiones por la aplicación de filtros electrostáticos en equipos del mercado nacional. Este se realizó siguiendo la proyección del parque de calefactores de la Figura 42 y la penetración de la medida en distintos escenarios.

Para estimar los costos, se utilizó la misma estimación del parque de calefactores y penetración de la medida, resultado en un acumulado de equipos de aproximadamente 570.000 y 770.000 calefactores en los escenarios de penetración 1 y 2 respectivamente, el detalle de cada tipo de calefactor de muestra en la Tabla 65.

Tabla 65, Cantidad de equipos con aplicación de filtros electrostático, en cada escenario de penetración de la medida.

Cantidad de equipos		
	Penetración 1	Penetración 2
Calefactor de doble Cámara	352.606	422.097
Estufa Hechiza	21.910	30.995
Salamandra	84.248	102.447
Calefactor de cámara simple	28.369	39.996
Cocina a leña	126.436	143.819
Total	613.569	739.353

Según las fuentes levantadas de costos de filtros electrostáticos¹⁶⁷ del mercado nacional, se consideró un valor promedio de \$400.000 por unidad adquirida. Mientras que los costos de mantención no pudieron ser levantados, por lo que se realizó un supuesto de \$30.000 anuales en base a datos de otros tipos de mantenciones relacionadas a la calefacción a leña que el equipo consultor maneja. De esta forma se realizó el cálculo de los costos de la implementación de este tipo de medidas, en cada uno de los escenarios de penetración presentados, indicados en la Tabla 66 y Tabla 67, para valores en CLP y UF respectivamente. Por último, en la Tabla 68 se indica el costo total en UF asociados a la implementación de estas medidas.

Tabla 66, Costos de inversión y mantención en CLP de la aplicación de filtros electrostáticos, en cada escenario de penetración de la medida.

	Penetración 1		Penetración 2	
	Costo inversión (MMCLP)	Costo mantención (MMCLP)	Costo inversión (MMCLP)	Costo mantención (MMCLP)
Calefactor de doble Cámara	141,0	10,6	168,8	14,8
Estufa Hechiza	8,9	51,8	12,4	70,4
Salamandra	33,7	3,8	41,0	5,8
Calefactor de cámara simple	11,3	12,7	16,0	17,5
Cocina a leña	50,6	5,2	57,5	7,8
Total	245,4	84,1	295,7	14,6

¹⁶⁷ <https://www.mpzero.cl>

Tabla 67, Costos de inversión y mantención en UF de la aplicación de filtros electrostáticos, en cada escenario de penetración de la medida.

	Penetración 1		Penetración 2	
	Costo inversión (UF)	Costo mantención (UF)	Costo inversión (UF)	Costo mantención (UF)
Calefactor de doble Cámara	3.845.876	288.441	4.603.816	397.457
Estufa Hechiza	238.970	1.411.207	338.060	1.920.884
Salamandra	918.894	103.823	1.117.387	157.627
Calefactor de cámara simple	309.423	346.757	436.234	476.429
Cocina a leña	1.379.043	142.954	1.568.635	212.607
Total	6.692.207	2.293.181	8.064.132	3.165.004

Tabla 68, Costo total de la implementación de filtros electrostáticos en cada escenario de penetración de la medida.

	Costo Total (UF)	
	Penetración 1	Penetración 2
Calefactor de doble Cámara	4.134.317	5.001.273
Estufa Hechiza	1.650.176	2.258.944
Salamandra	1.022.718	1.275.014
Calefactor de cámara simple	656.180	912.663
Cocina a leña	1.521.997	1.781.242
Total	8.985.388	11.229.137

A continuación, se realizó el cálculo de los costos en relación a la disminución de las emisiones de $MP_{2,5}$ de la implementación de estas medidas, en costos en UF sobre las toneladas de $MP_{2,5}$ abatidas. Estos resultados se muestran en la Tabla 69, donde se observó que el costo por unidad de emisión abatida es menor para el caso de mayor penetración, esto tiene sentido dado que aplica a una mayor cantidad de equipos que presentan mayores emisiones de $MP_{2,5}$, como los equipos hechizos, salamandras y cocinas a leña. Por tanto, el foco de este tipo de medidas debe ser en equipos de mayores emisiones, para así disminuir los costos de implementación.

Tabla 69, Resultados del cálculo de costos de implementación sobre emisiones de MP_{2,5} abatidas.

Relación Costo implementación (UF)/emisiones de MP _{2,5} abatidas (t/año)		
	Penetración 1	Penetración 2
Calefactor de doble Cámara	1680,1	705,2
Estufa Hechiza	1720,0	1765,2
Salamandra	352,2	529,3
Calefactor de cámara simple	503,5	428,8
Cocina a leña	447,8	397,5
Total	814,9	645,7

14.12. Beneficios en evaluaciones internacionales

Para dar a conocer el levantamiento de información sobre evaluaciones internacionales donde se calcularon y establecieron distintos tipos de beneficios, entre ellos mortalidad y morbilidad, se presenta a continuación una serie de estudios y análisis de algunos países a considerar.

Realizar una comparación de beneficios entre los estudios no es factible, ya que existe la problemática de proyectos donde no toda la información está completamente pública, como por ejemplo, la existencia de estudios generales para contaminantes atmosféricos sin especificación del tipo de emisión, tipo de fuentes que las producen, sin señalar porcentajes de emisiones o el porcentaje de emisión correspondiente a cada fuente o simplemente no enseñan cifras cuantitativas y solo recalcan que son datos en base a supuestos por la falta de información.

Aun así, los próximos estudios fueron utilizados para generar nuevas políticas o revisar si son factibles sus normas y limitaciones de emisiones de contaminantes, en particular de material particulado generado por quema de leña, a pesar de que no poseen puntos en común, como lo son la cantidad de años de las proyecciones, las políticas implementadas, objetivos y a los sectores que se dirigen los estudios.

14.12.1. Resultados Colombia

Para el estudio “Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM₁₀ en Bogotá” (Edison Y. Ortiz-Durán y Néstor Y. Rojas-Roa, 2012)¹⁶⁸ se estimaron los beneficios en salud asociados a la reducción del promedio anual de concentración de material particulado a 50µg/m³ en el periodo 2010 – 2022. Para ello se determinaron los

168

https://www.researchgate.net/publication/262843285_Estimacion_de_los_beneficios_economicos_en_salud_asociados_a_la_reduccion_de_PM10_en_Bogota

casos de morbilidad y mortalidad y se estimó su valoración económica anual, realizando un análisis por Costos de Enfermedad (COI) al 2009 usando una tasa de descuento del 3%, recomendada por la US-EPA, y asegurando los resultados por localidad.

Se utilizaron funciones de concentración-respuesta para determinar los casos atribuibles a mortalidad u hospitalización por causas respiratorias y cardiovasculares, para los demás se utilizaron proporciones de los servicios.

Para determinar la relación entre un cambio en la concentración de PM10 y la respuesta de dicho cambio en una población específica, se emplearon Funciones de Concentración-Respuesta (FCR), asociado a los cambios de concentración de un contaminante en específico y para los efectos de la Tabla 70.

Tabla 70, Parámetros empleados para el estudio en Colombia

Efecto	Edad
Mortalidad a largo plazo (MLP)	> 30 años
Mortalidad Infantil (MI)	< 1 año
Hospitalizaciones Causas respiratorias (AHR)	< 5 años
Hospitalizaciones Causas respiratorias (AHR)	> 5 años
Hospitalizaciones Causas Cardiovasculares (AHC)	> 65 años

El estudio demostró que podrían evitarse, por exposición a largo plazo, 21.000 muertes para mayores de 30 años y 900 en menores de un año. En cuanto a hospitalizaciones por causas respiratorias; para menores de 5 años, podrían evitarse 12.000 y 3.800 atenciones en salas de urgencias, 34.000 visitas a las salas ERA y 2.500 visitas a las unidades de cuidados intensivos.

*Tabla 71. Localidades más beneficiadas en muertes evitables (*en miles de millones de pesos y VPN 2011)*

Localidad	Muertes Evitables	Valoración económica*
Kennedy	4.700 (3.420 – 5.970)	4,6 (3,3 – 5,8)
Ciudad Bolívar	3.500 (2.550 – 4.440)	3,4 (2,5 – 4,3)
Bosa	3.420 (2.490 – 4.310)	3,3 (2,4 – 4,2)
Suba	1.870 (1.870 – 2.380)	1,8 (1,3 – 2,3)
Engativá	1.630 (1.180 – 2.070)	1,6 (1,1 – 2,0)

Mientras que, para las mayores de 5 años, se evitarían alrededor de 44.000 hospitalizaciones, 350 hospitalizaciones por causas cardiovasculares (en mayores de 65 años) y 155.000 atenciones en salas de urgencia en todo el periodo.

*Tabla 72 Localidades más beneficiadas en reducción de servicios hospitalarios (*en millones de pesos y VPN 2011)*

Localidad	Servicios Evitables	Hospitalarios	Valoración económica por COR*
Kennedy	61.500 (49.300–73.700)		44.100 (35.400–52.900)



Ciudad Bolívar	36.500 (29.300–43.700)	26.200 (21.000–31.400)
Bosa	33.200 (26.600–39.800)	23.900 (19.100–28.600)
Suba	26.400 (21.200–31.700)	18.900 (15.100–22.700)
Engativá	19.700 (15.800–23.700)	14.100 (11.300–16.900)

En conclusión, los beneficios económicos son alrededor de 180 mil millones de pesos en los costos de enfermedad y de más de 21 mil millones de pesos en mortalidad, entre el 2010 y 2020 para Bogotá con la reducción promedio anual de $MP_{2,5}$ a $50\mu g/m^3$.

14.12.2. Resultados Unión Europea y Reino Unido

Para la Unión Europea y el Reino Unido en su conjunto y en cuatro países individuales (Reino Unido, España, Italia y Polonia), se realizaron dos estudios importantes. El primer estudio se centra en una estimación de costos sociales relacionados con la salud, donde dejan en claro que la mayor fuente de material particulado en la zona es debido a estufas a leña y calderas sin condensación a carbón, y el segundo es un análisis del costo-beneficio de una proyección para disminuir las emisiones contaminantes del aire, con el fin de establecer nuevos estándares para una calidad de aire mejor. El segundo estudio no especifica las fuentes emisoras, sino que solo se hace referencia a emisión de material particulado en el aire, por lo que gracias al primero se puede tener noción de los porcentajes de las fuentes.

Para el estudio *“Health-related social costs of air pollution due to residential heating and cooking In the EU27 and UK” (Delft, CE Delft, 2022)¹⁶⁹*, se analizó el impacto de los contaminantes de aires, cuantificando costos sociales relacionados con la salud de la contaminación de aire exterior causada por calefacción y cocina residencial.

Los costos sociales derivados de la contaminación del aire debido a la calefacción y las cocinas residenciales en Europa son 29 mil millones de euros. Esto es un costo de 130 euros/año para un hogar común europeo (Tabla 73). El 94% de los costos se relacionan con las emisiones directas a partir de combustibles fósiles y biomasa, mientras que el 6% restante es producida por electricidad y calor.

Tabla 73 Costos sociales totales relacionados con la salud de la contaminación del aire exterior debido a calefacción y cocinas domésticas (2018)

País/ Región	Costo Total (Miles de Millones €)	Costo total por vivienda (€/año)
Polonia	3,3	228
Italia	4,7	180
UE27+ Reino Unido	29	130

¹⁶⁹

https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/CE_Delft_210135_Health-related_social_costs_of_residential_heating_and_cooking_Def_V1.2.pdf

España	1,2	65
Rino Unido	2,7	92

Los principales contribuyentes a la contaminación del aire son principalmente combustibles utilizados para la calefacción domésticas. Polonia es el que más costos asociados tiene ya que su principal calefacción son las calderas de carbón. En Italia, la mayor contaminación es provocada por las estufas a leña, la cual a pesar de ser un 22% del consumo de energía total de los hogares, cubren el 75 % de los costos relacionados con la salud en el país. Al igual que Reino Unido, y la Unión europea en conjunto, donde del 40 % y 31% respectivamente son costos asociados a estufas a leña.

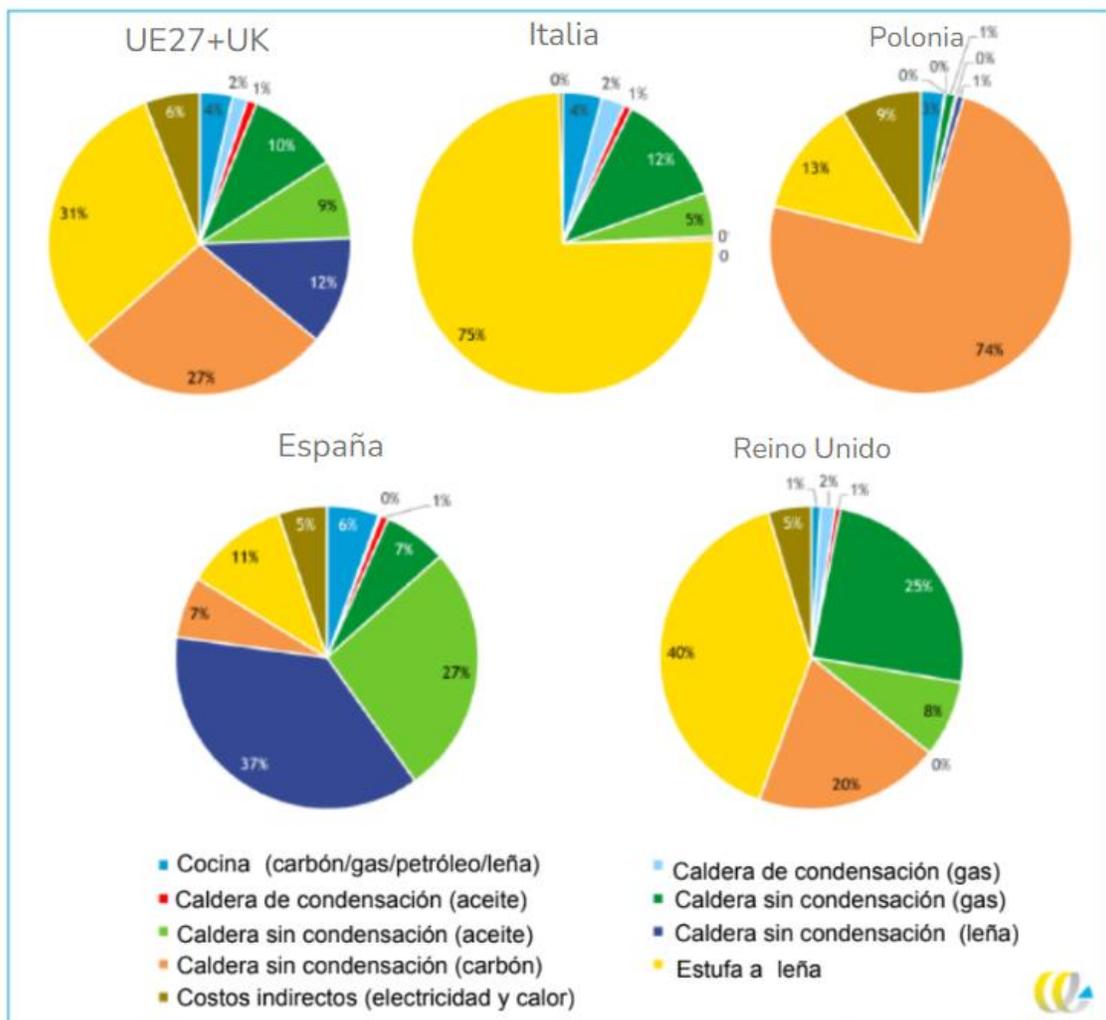


Figura 62 Costos sociales totales relacionados con la salud debido a la contaminación exterior diferenciados por combinación de técnicas y combustibles. Fuente: Health-related social costs of air pollution due to residential heating and cooking In the EU27 and UK (Delf, CE Delft. Mayo 2022)

Para cada uno de los combustibles se calcularon los costos sociales relacionados a la salud,

Combinación técnica-combustible	Costo por unidad de producción entregada (€/GJ)	Costo por vivienda (Promedio €/año)
Caldera sin condensación - carbón	29,2	1.233,3
Estufa a Leña	17,9	756,1
Caldera sin condensación - leña	3,8	159,3
Estufa de aceite de petróleo	3,3	139,8
Caldera de condensación - leña	3,2	136,8
Caldera sin condensación - aceite	2,9	122,8
Caldera de condensación - aceite	2,5	105,4
Estufa a Gas	1,8	77,0
Radiadores eléctricos	1,0	40,2
Caldera sin condensación - Gas	0,7	30,0
Caldera de condensación - Gas	0,6	25,7
Calor y electricidad combinados (CHP)	0,7	20,0
Calefacción Distrital	0,3	13,5
Bomba de calor aerotérmica	0,3	10,9
Bomba de calor geotérmica	0,2	8,7
Solar	0,0	0,0

donde se muestra en la Tabla 74 que las calderas de carbón y las estufas de leña tienen los mayores costos relacionados con salud, siendo de aproximadamente 1.233 € al año las calderas y las estufas a leña de 756 € al año aproximadamente.

Tabla 74 Costo social promedio relacionado con la salud de las combinaciones técnica-combustible para calefacción en la UE27 y el Reino Unido (2018)

En este estudio, los impactos en la salud de la contaminación al interior de las viviendas no se han tenido en cuenta cuantitativamente ya que la literatura muestra que la metodología para estimar esos costos aún necesita más investigación y verificación, lo que significa que los costos relacionados con la salud son solo de contaminación exterior. Y los efectos que se han incluido son los del marco de la OMS (2013), los cuales son para concentración de MP10/MP2,5; mortalidad por todas las causas (crónica), mortalidad infantil, pérdidas de día de trabajo, días de actividad restringida (menores y netos), bronquitis crónica (EPOC), admisiones hospitalarias respiratorias e ingresos hospitalarios cardiovasculares. Para Concentraciones de Ozono; Mortalidad aguda, admisiones hospitalarias, respiratorias y cardíacas, y días de actividad restringida (menores). Finalmente, para concentraciones de NO₂ se estudiaron los efectos de mayor riesgo de mortalidad (a largo plazo), bronquitis en niños asmáticos y admisiones hospitalarias respiratorias.

En el estudio “*Study to support the impact assessment for a revision of the EU Ambient Air Quality Directives, Final Report, (European Commission, 2022)*” realizado con el fin para crear un plan de acción europeo con recomendaciones de Organización mundial de la salud, se analiza el costo-beneficio de una proyección para disminuir las emisiones contaminantes del aire, con el fin de establecer nuevos estándares para una calidad de aire mejor. Las proyecciones son del año 2020 a los años 2030 y 2050, donde utilizan las concentraciones de emisiones base del año 2020, para crear casos de reducción máxima factible (MTFR) para alcanzar el objetivo de las políticas que son de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las concentraciones anuales de Material particulado activas en el ambiente para esos años (2030 y 2050).

La Figura 63 enseña el impacto de los escenarios en la morbilidad, cuyos resultados de salud corresponden cualitativa y cuantitativamente con los de la mortalidad crónica causada por la exposición a $\text{MP}_{2,5}$. Los impactos dependen de cada escenario, si las concentraciones no varían respecto a las concentraciones objetivo, el impacto en la salud es limitado, en línea con los resultados de mortalidad. Para el resto de los escenarios, el impacto es significativo y la diferencia entre OPT y MTFR es pequeño.

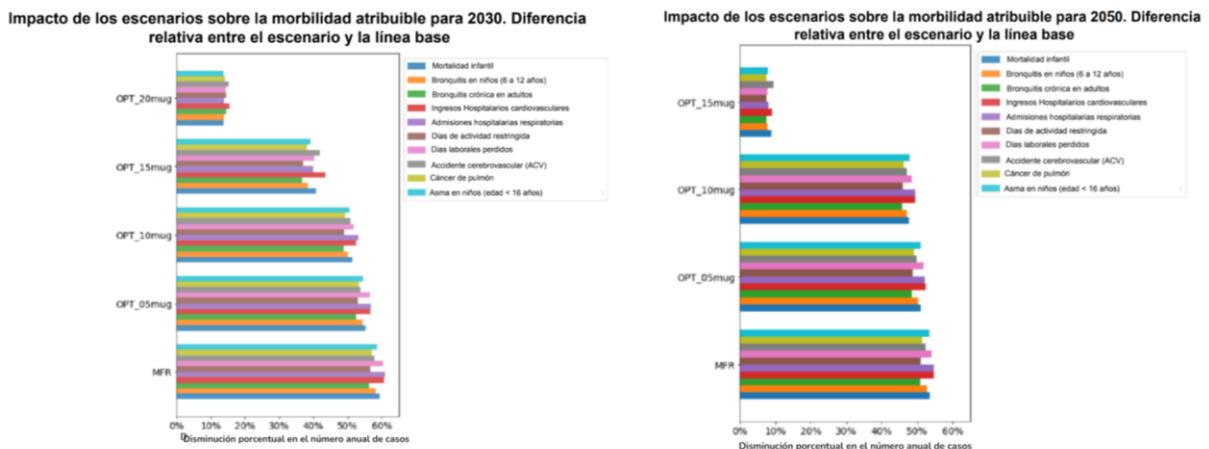


Figura 63, Impacto relativo de los escenarios sobre la morbilidad en la UE-27 causada por la exposición a la contaminación del aire a niveles superiores a las directrices AQ de la OMS para 2030 (izquierda) y 2050 (derecha). Las distintas barras corresponden a los diversos resultados de morbilidad considerados en el análisis principal del estudio.

Para material particulado, el impacto de la mortalidad dependerá del escenario (OPT). Estando las concentraciones de referencia cercanas a las concentraciones puestas como objetivo, el impacto de los escenarios en la salud es bastante limitado. Por ejemplo, los escenarios $\text{OPT} 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2030 y el $\text{OPT} 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2050, respectivamente su impacto es de 15 % y 8 %. Para el resto de los escenarios el impacto en salud es significativo, y en muchos casos la diferencia entre el impacto en la salud de los escenarios OPT y el escenario MTFR es limitado.

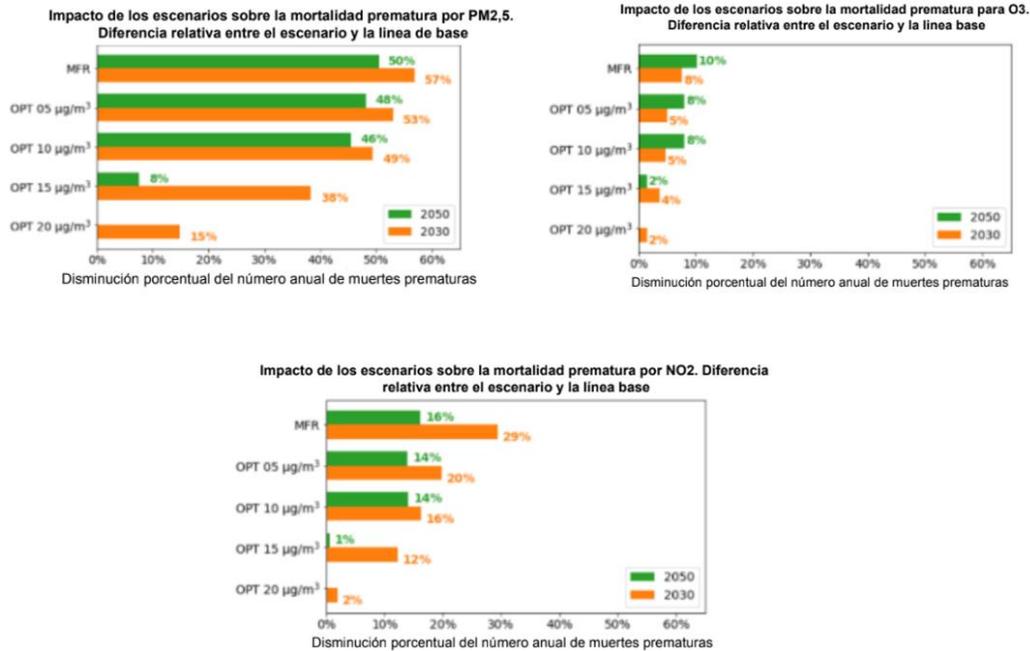


Figura 64. Impacto relativo de los escenarios en el número de muertes prematuras anuales en la UE-27 causadas por la exposición a la contaminación del aire a niveles superiores a las directrices AQ de la OMS para tres contaminantes (PM2,5, arriba a la izquierda, O3, arriba a la derecha, NO2, abajo).

En el caso del dióxido de nitrógeno, el impacto para los escenarios OPT depende del año bajo consideración. Para 2030, el OPT20 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ solo tiene un pequeño impacto (2%), mientras que el impacto aumenta gradualmente para los escenarios más estrictos (12%, 16% y 20% a medida que se disminuye la emisión objetivo). En 2050, el impacto del escenario OPT15 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ es menor (1%), mientras que el impacto para los otros escenarios OPT es muy similar al impacto del escenario de reducción máximo factible (MTR).

Finalmente, en el caso del Ozono el impacto de los escenarios es pequeño, y la diferencia de escenarios solo varía en aproximadamente de un 2% a un 3%.

Costos y beneficios

La Tabla 75 muestra los resultados del análisis, donde se presentan dos conjuntos de resultados que presentan diferentes enfoques para monetizar los impactos sobre la mortalidad: un VSL enfoque de valor social estadístico, que monetiza el número de muertes y un enfoque VOLY o valor de vida que monetiza los años de vida perdida.

Tabla 75 Costos y beneficios (valores netos) para la sociedad (valorización de los impactos en la salud, tanto mortalidad como morbilidad) por año (en miles de millones de euros a precios de 2015, UE27)

Enfoque para valorar la mortalidad	Escenario	2020	2030	2050
VSL	Año Base	739	444	332



Enfoque para valorar la mortalidad	Escenario	2020	2030	2050
VSL	OPT 20	-	408	-
VSL	OPT 15	-	352	320
VSL	OPT 10	-	325	266
VSL	OPT 5	-	317	263
VSL	MTFR	-	303	256
VSL Neto	OPT 20	-	36	-
VSL Neto	OPT 15	-	92	12
VSL Neto	OPT 10	-	119	66
VSL Neto	OPT 5	-	127	69
VSL Neto	MTFR	-	141	77
VOLY	Año Base	251	140	90
VOLY	OPT 20	-	128	-
VOLY	OPT 15	-	109	87
VOLY	OPT 10	-	100	71
VOLY	OPT 5	-	97	70
VOLY	MTFR	-	92	68
VOLY Neto	OPT 20	-	12	-
VOLY Neto	OPT 15	-	31	3
VOLY Neto	OPT 10	-	40	19
VOLY Neto	OPT 5	-	43	20
VOLY Neto	MTFR	-	48	22

Los beneficios monetizados son menores bajo el enfoque VOLY que con el VSL y aumentan con la ambición del escenario y disminuyen con el tiempo. En todos los posibles escenarios (OPT) para cumplir el objetivo de las políticas y años según el enfoque VSL, la proporción de los efectos de la morbilidad en la valoración total de los beneficios para la salud humana oscila entre el 1% y el 6%, mientras que para el enfoque VOLY es de un 5% a un 19 %.

14.12.3.Resultados Estados Unidos

Para EE.UU se realizó el estudio “The benefits and costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020 -U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation” (U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation, 2011), en el cual se evaluaron los beneficios en salud, a través de la aplicación de un marco y principios de análisis costo-beneficio, al implementar el programa Clean Air Act y Amendments de 1990. El objetivo fue estimar estos costos y beneficios proyectando al 2020, dos escenarios, uno aplicando las Enmiendas de 1997 del programa y el otro utilizando el programa tal como estaba hasta 1990.

La EPA mantuvo como objetivo considerar una amplia gama de efectos sobre la salud-bienestar humano o calidad de vida y ecológicos, a pesar de que algunos efectos contribuyen de forma mínima a los costos y beneficios. Dentro de la metodología para calcular los costos asociados a los controles de emisiones, asignan todas las fuentes de emisiones importantes una categoría, las cuales son: Unidades generadoras de electricidad, Fuentes industriales no relacionadas con servicios públicos, Vehículos de carretera y combustibles, Vehículos (resto de transporte, que no transita en carretera) y combustibles y Fuentes aéreas. El costo total anual estimado para 2020 fue de aproximadamente 65 mil millones de dólares (valor 2016), donde aproximadamente el 40% se encuentra dentro del tema de combustible e implementación de programas de inspección y mantenimiento para vehículos.

Estos costos representan la implementación de programas de control para cumplir con los estándares de material particulado y ozono. Las reducciones asociadas a los programas influyen mayoritariamente a la disminución de ozono y material particulado. Además de que alrededor del 40% de la reducción de material particulado de emisión directa se logra a través de controles de fuentes como el polvo de construcción y estufas de leña residenciales.

Los beneficios en salud proyectado a 2020 se pueden apreciar en la Tabla 76.

Tabla 76 Resultados de los efectos de la salud asociadas a MP2,5 y Ozono, para ambos escenarios.

Reducciones de Efectos sobre la Salud (MP2.5 y Ozono)	Contaminante(s)	Año 2010	Año 2020
Mortalidad en Adultos por MP2,5	MP	160.000	230.000
Mortalidad Infantil por MP2,5	MP	230	280
Mortalidad por Ozono	Ozono	4.300	7.100
Bronquitis Crónica	MP	54.000	75.000
Bronquitis Aguda	MP	130.000	180.000

Reducciones de Efectos sobre la Salud (MP2.5 y Ozono)	Contaminante(s)	Año 2010	Año 2020
Infarto Agudo al Miocardio	MP	130.000	200.000
Exacerbación del Asma	MP	1.700.000	2.400.000
Admisiones Hospitalarias	MP, Ozono	86.000	135.000
Visitas a sala de emergencia	MP, Ozono	86.000	12.000
Días de actividad restringida	MP, Ozono	84.000.000	110.000.000
Días de pérdida escolar	Ozono	3.200.000	5.400.000
Días laborales perdidos	MP	13.000.000	17.000.000

La reducción del riesgo de mortalidad asociada al material particulado es la más significativa de todas. Además de esta reducción también se estima que la exposición a MP y ozono disminuye otras enfermedades importantes, como la bronquitis crónica y el infarto agudo de miocardio, y las visitas a urgencias e ingresos hospitalarios.

Además de los beneficios directos para la salud, también se evaluaron el bienestar y la salud ecológica, para los cuales existía información de la valoración económica. Estos efectos son: Bienestar Humano Cuantificado y efectos ecológicos, Visibilidad en zonas residenciales, Visibilidad en zonas recreativas, Madera Comercial, Agricultura, Pesca recreativa y Daños materiales.

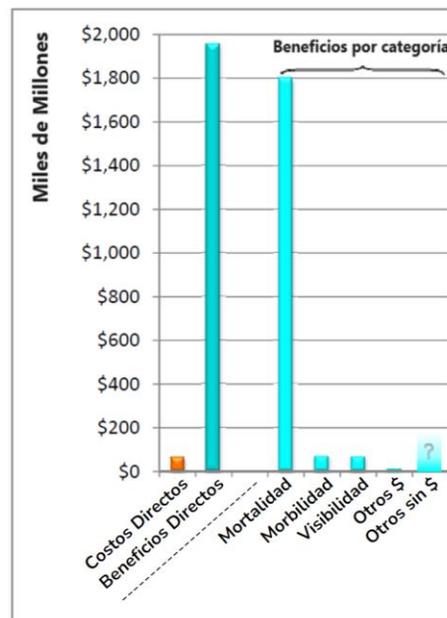


Figura 65, Estimaciones de costos y beneficios directos por efecto proyectados a 2020. (En miles de millones de dólares del año 2006).

En la Figura 64 se aprecia en la dos primeras barras que los beneficios totales superan los costos totales. Las demás barras de la derecha muestran los efectos analizados para el cálculo de beneficios. Se observa que tanto la mortalidad como la morbilidad supera los costos totales. La última barra simboliza los beneficios asociados con el cambio que no pueden ser monetizados.

Finalmente, haciendo una comparación entre los costos y los beneficios directos, para el año 2020 se proyectaron costos de 65 mil millones de dólares y un beneficio total directo de 1.951 mil millones de dólares. Restando los costos a los beneficios totales, se obtiene un beneficio neto de 1.886 mil millones de dólares al valor del año de 2006.

14.12.4. Resultados Nueva Zelanda

En Nueva Zelanda solo concentraciones de material particulado procedente de fuentes nacionales, industriales, vehículos motorizados y naturales, además clasificadas por tipo de equipo doméstico y por sector en las industrias. En el estudio “Air Quality Cost-Benefit Analysis – Update Review of the National Environmental Standards for Air Quality– Policy Options” (Greg Akehurst, Tilly Erasmus y Lawrence McIlrath, 2019) se hicieron proyecciones cada 5 años hasta el año 2028, siendo el año base el 2013.

Establecer nuevas políticas como límites de emisiones para nuevos equipos domésticos, se traducen como disminución de concentración de material particulado y por ende en beneficios para la salud y costos asociados al sector privado (como el remplazo de equipos) y al sector público como regulatorios y de aplicación.

Los objetivos de las políticas aplicadas son disminuir los quemadores de combustible sólido de 0,5 g/kg hasta llegar a cero en 2028, retirar los quemadores de combustible de 1,0 g/kg y 1,5 g/kg con una tasa de 6,5 % anual y los mayores a 1,5 g/kg retirarlos con una tasa de un 1% anual para las chimeneas y un 6,5% anual para estufas a leña. Esto se asumió con los siguientes porcentajes actuales: Quemadores de combustibles sólidos son un 83%, donde el 78% son de 1,0 g/kg y un 5% de 0,5 g/kg, mientras que el 17% restante equivale bombas de calor. También se asumió que los hogares preferirán un recambio por la siguiente mejora en emisiones.

En el estudio se utilizó el valor de vida estadístico (VOSL) para cuantificar el costo de la mortalidad prematura atribuible a la contaminación a precios de junio de 2015. Además, en modo de comparación de métodos también se calculó el valor de los años de vida perdidos (VLYL), el cual es un método alternativo para cuantificar el costo de la mortalidad prematura.

Los costos del gobierno local están asociados al plan en sí mismo. Los costos por ingreso hospitalario (cardiovasculares - CHA y respiratorios - RHA) son una combinación de costos médicos y pérdida de producción de la persona mientras esta hospitalizada. Para CHA se

asumieron 5 días de hospitalización, mientras que para RHA 3 días. Costo RHA es de 7.432 dólares neozelandeses y de CHA de 5.381 dólares neozelandeses por incidente. Para el análisis se utilizó una tasa de descuento de un 8%

Tabla 77 Efectos sobre la salud y costo por efecto.

Efectos sobre la salud	Costos (dólares neozelandeses)
Mortalidad prematura (VOSL)	4,06 millones
Mortalidad prematura (VLYL)	189,104 por año
Admisiones hospitalarias respiratorias (RHA)	5.381
Admisiones hospitalarias cardiovasculares (CHA)	7.432
Días de actividad restringida	70 por día

El resto de los costos del estudio se puede resumir en la siguiente tabla (Tabla 78), donde se consideran los costos privados, propios de las viviendas, como el cambio de equipos, la instalación, las nuevas aplicaciones, etc., y los costos que tendrá el gobierno, tanto regional como central.

Tabla 78 Costos y beneficios es una representación gráfica

		Millones de dólares neozelandeses
Total	Costos: Costos públicos y privados	159,6
	Beneficios: Costos sanitarios evitados	1.409,4
VPN	Costos: Costos públicos y privados	97,7
	Beneficios: Costos sanitarios evitados	820,2

Finalmente, los costos de salud evitados o los beneficios de mejorar la calidad del aire son mayores que los costos y se estima que estos ahorros en los costos de salud sean de 820 millones dólares neozelandeses en valores VPN.

La Tabla 79 realiza una comparación por región de los costos por vivienda, la reducción de mortalidad y la relación costo - beneficio.

Tabla 79 Ahorro regional neto en costos de salud en la proyección 2017 – 2028 en millones de dólares neozelandeses

Región	Costo evitado					
	VPN	Sin descuento	Costo privado	Reducción de mortalidad (Vidas)	de	Relación costo-beneficio
Northland	-\$3.6	-\$6.2	\$5.7	2		1.1
Auckland	-\$158.3	-\$273.2	\$36.0	91		7.3
Waikato	-\$125.5	-\$215.5	\$16.9	72		12.3
Bay of Plenty	-\$51.2	-\$87.7	\$3.9	29		21.5
Gisborne	-\$19.7	-\$33.8	\$3.1	11		10.7
Hawke's Bay	-\$74.9	-\$128.5	\$6.8	43		18.4
Taranaki	-\$0.6	-\$1.1	\$4.6	0		0.2



Costo evitado						
Región	VPN	Sin descuento	Costo privado	Reducción de mortalidad (Vidas)	de	Relación costo-beneficio
Manawatu-Wanganui	-\$2.9	-\$5.0	\$2.0	2		2.5
Wellington	-\$110.6	-\$189.6	\$27.1	63		6.8
West Coast	-\$0.3	-\$0.6	\$0.2	0		2.7
Canterbury	\$0.0	\$0.0	\$-	0		-
Otago	-\$110.0	-\$188.7	\$22.2	62		8.2
Southland	-\$39.9	-\$68.6	\$10.3	23		6.5
Tasman	-\$35.3	-\$60.6	\$1.2	20		50.4
Nelson	-\$59.3	-\$101.9	\$3.5	33		28.0
Marlborough	-\$28.2	-\$48.4	\$2.5	16		18.7
TOTAL Nueva Zelanda	\$-820	-\$1,409.4	\$145.8	468		

14.12.5. Resultados Chile

En Chile se realizó el “Análisis costo-beneficio de la calefacción distrital en la zona central de Chile” (Carrasco Vidal, Jiménez Del Río y Mardones Poblete, 2015), ya que la combustión residencial de leña en calefactores de baja eficiencia es la principal razón de las altas concentraciones de material particulado en la zona. Este costo-beneficio fue a través de la implementación de calefacción distrital con base en la biomasa, ya que este cambio generaría una disminución de $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual de material particulado fino.

La estimación de beneficios se logró de acuerdo con la metodología AGIES. Los casos fueron valorizados según el criterio de costo evitado en enfermedades y mortalidad prematura, tal como se muestra en la Tabla 80. Los beneficios se valoraron según la alternativa con menor costo, mediante el uso de calefactores a leña y para agua caliente sanitaria producida por gas, con un costo de 49,08 pesos chilenos/kWh.

El análisis costo-beneficio se realizó para comparación de beneficios sociales y los costos del proyecto, considerando una tasa de descuento social de un 6% y una vida útil de 30 años, alcanzando un valor de 2.479 millones en pesos chilenos.



Tabla 80 Valores unitarios por casos evitados en UF/caso (valor UF de diciembre 2013).

	Efecto	Niños	Adultos 18-29	Adultos 30-64	Adultos mayores
Mortalidad	Largo plazo	14920	14920	14920	14920
Admisiones hospitalarias	Asma	26	28	28	0
	Cardiovascular	0	56	56	56
	Respiratorias crónicas	0	36	36	37
	Neumonía	0	0	0	40
Visitas salas de emergencia	Asma	1	0	0	0
Productividad perdida	Días laborales	0	1	1	0
	Días de actividad restringida	0	0	0	0
	Días de actividad restringida menor	0	0	0	0

La Tabla 81 muestra los resultados obtenidos del análisis, donde los beneficios sociales superan los costos del proyecto en todos los escenarios de inserción del sistema de calefacción distrital.

Tabla 81 Resultados del análisis costo-beneficio y costo-efectividad (en Millones de pesos chilenos)

CUADRO VI. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO Y COSTO-EFECTIVIDAD

Escenarios	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Costos (MMCh\$)	206.4	289.6	363.5	440.9	515.7	590.6	665.7	742.0	817.2	887.2
Beneficios (MMCh\$)	249.8	497.9	746.4	993.4	1240.5	1489.7	1736.7	1985.2	2233.3	2478.8
B/C	1.21	1.72	2.05	2.25	2.41	2.52	2.61	2.68	2.73	2.79
Δ Emisiones, ton PM _{2.5}	4.31	8.62	12.9	17.2	21.5	25.8	30.14	34.42	38.73	43.02
Δ Concentración PM _{2.5}	0.56	1.11	1.67	2.22	2.78	3.33	3.89	4.44	5.00	5.55
MMCh\$/ton PM _{2.5}	47.9	33.6	28.1	25.6	24.0	22.9	22.1	21.6	21.1	20.6
MMCh\$/μg/m ³ PM _{2.5}	371	261	218	198	186	177	171	167	164	160

MMCh\$ = Millones de pesos chilenos, B/C = Beneficios/costos mayor a 1 indica que los beneficios sociales superan a los costos del proyecto. Fuente: elaboración propia

Finalmente, esta opción de recambio de calefacción para 1.826 viviendas, el cual tiene una reducción de emisiones de MP_{2,5} de 5,5 μg/m³, posee un beneficio social evaluado en 2.479 millones de pesos chilenos anuales.

En otro estudio chileno “Costos de contaminación ambiental sobre la salud”¹⁷⁰, se utilizó una suerte de lógica inversa, ya que utiliza la información relativa a los costos evitados por la aplicación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA), usando el AGIES de cada PPDA.

El Primer Reporte del Medio Ambiente (MMA, 2013) informa que abordar la contaminación traería beneficios en salud valorizados en 670 millones de dólares al año. La Tabla 82, indica los costos asociados a la salud.

170

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23596/2/Costos%20de%20contaminaci%20ambiental%20sobre%20la%20salud%20ed%20coord%202_Eval.pdf

Tabla 82 Costos asociados a la salud

Tipo de Efecto	Causa	N° de Eventos	Impacto Económico (MMUSD/Año)		
			Costos Médicos	Productividad Perdida	TOTAL
Mortalidad Prematura	Cardiopulmonar	4.070	0	590	590
Admisiones Hospitalarias	Asma	130	0,13	0,011	0,14
	Cardiovasculares	1.350	2,8	0,27	3,1
	Pulmonar Crónica	179	0,23	0,032	0,26
	Neumonía	700	0,97	0,15	1,1
Visitas Sala Urgencia	Bronquitis Aguda	127.000	4,8	1,6	6,5
Restricción de Actividad	Días Laborales Perdidos	871.000	0	29	29
	Días con Actividad Restringida	3.730.000	0	37	37
TOTAL			9	660	670

El Gobierno implementó la "Estrategia de Descontaminación Atmosférica en Chile: 2014-2018", cuyos objetivos consistieron en desarrollar planes de descontaminación en las zonas declaradas como saturadas o latentes en Chile. Además, se buscó aplicar medidas a corto plazo en áreas sin planes específicos, pero con registros de altas concentraciones de material particulado según datos de monitoreo. Entre las acciones emprendidas se incluyeron el reacondicionamiento térmico de viviendas, la sustitución de sistemas de calefacción contaminantes por opciones más eficientes y con menores emisiones, la mejora en la calidad de la leña utilizada, la diversificación de los combustibles para calefacción, y la implementación de programas educativos y de difusión en la comunidad.

En cuanto a los beneficios, se evaluaron los impactos en términos de mortalidad prematura, morbilidad, días de actividad restringida y productividad perdida. A continuación, se presentan los resultados del AGIES para la zona de Coyhaique y sus áreas circundantes.

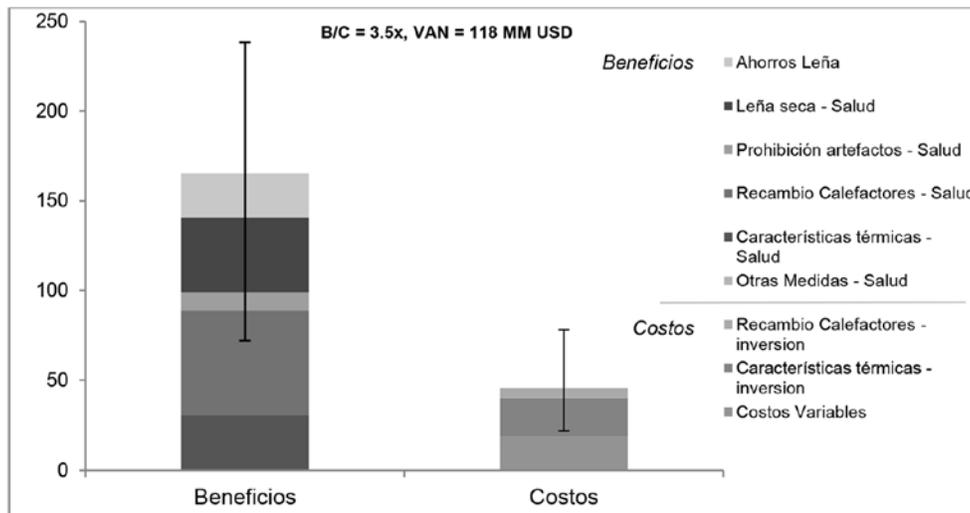


Figura 66. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C (Miles de millones de dólares)

La razón beneficio/costo es 3,5, es decir, los beneficios obtenidos ascenderían a 3,5 veces sus costos, en tanto que el valor actual neto (VAN) de dicha relación (el beneficio social neto) asciende a 118 mil millones de dólares, valor que representa la diferencia entre beneficios y los costos asociados a la implementación del PPDA. El valor actual neto (VAN) de los beneficios del PPDA asciende a 165 mil millones de dólares; en tanto que los beneficios en salud asociados dan cuenta del 85%.

Dentro de los beneficios en la salud, la reducción de riesgos fatales alcanza cerca de un 97%, mientras que el resto se asocia a la reducción de los costos relacionados con el tratamiento de enfermedades y pérdida de productividad. Los mayores costos del PPDA (43% del total) se asocian a los subsidios de aislación térmica, en tanto que el recambio por equipos de pellets da cuenta del 38% de los costos totales.

En la Figura 67 se puede apreciar la distribución de los costos y beneficios.

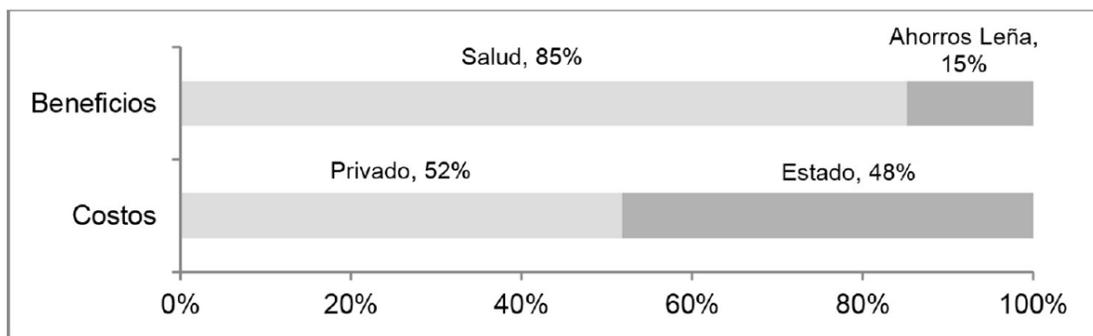


Figura 67. Distribución de beneficios y costos del PPDA

Finalmente, la Tabla 83 resume los costos y beneficios asociados a la implementación del PPDA en miles de millones de dólares y la razón beneficios/costos, para Coyhaique y sus alrededores.

Tabla 83 Beneficios y costos de las principales medidas del plan.

Medidas	Beneficio Total (MMUSD)	Costo Total (MMUSD)	Razón B/C
Leña Seca	42	5	8,5
Prohibición Gradual Calefactores	10	1	7,5
Puntuales DAE-Límite de Emisiones MP, SO2	0	0	15,1
Recambio Estufas Cumple Norma	28	2	16,6
Recambio Estufas Pellet	31	18	1,7
Prohibición Chimeneas	1	0	24,4
Quemas – Restricción Meses	0	0	4,2
Reacondicionamiento Térmico	53	20	2,6
Viviendas Nuevas – Nueva Norma	1	1	0,7
Total General	165	47	3,5

La misma metodología se utilizó para las comunas de Chillán y Chillán Viejo, y Talca y Maule.

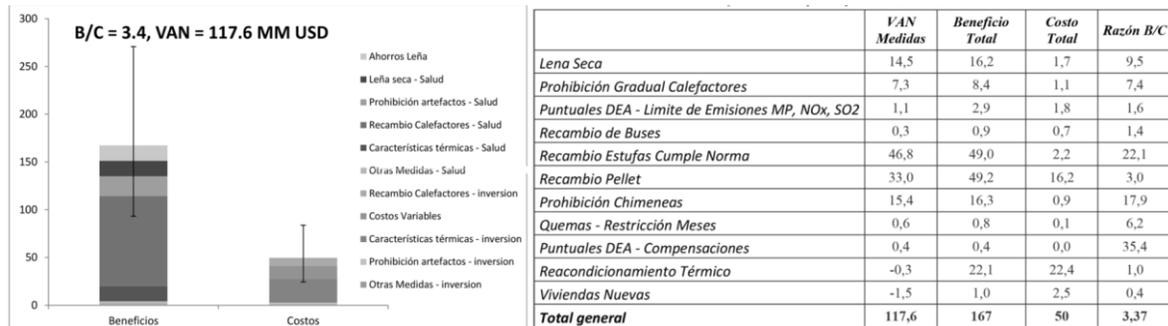


Figura 68. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C en miles de millones de dólares (a la izquierda) y Resumen de los costos y beneficios de la medida para Chillán y Chillán Viejo.

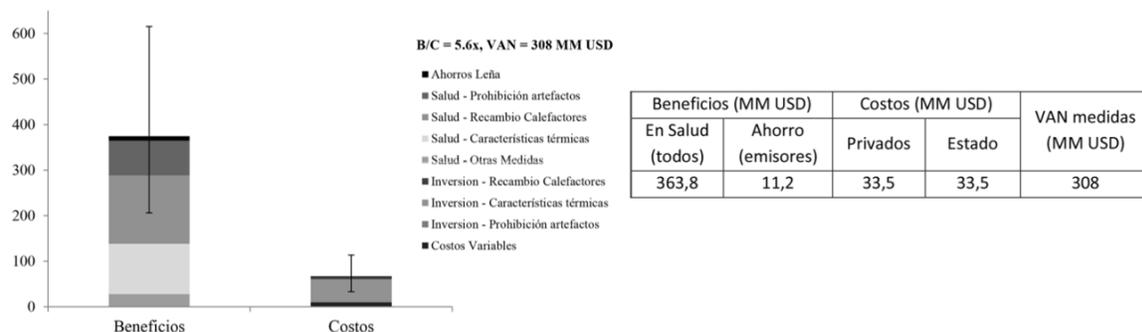


Figura 69. Valor presente de beneficios, costos, beneficio neto y razón B/C en miles de millones de dólares (a la izquierda) y Resumen de los costos y beneficios del anteproyecto PPDA MP10 en Talca y Maule.

Finalmente, en los tres sectores de Chile se demuestra que el beneficio total es superior a los costos de implementación para esta medida.