

Chapter Title: CASO DE ESTUDIO: TEMUCO-PADRE LAS CASAS, IX REGIÓN

Book Title: Introducción a la contaminación atmosférica

Book Author(s): Héctor Torquera González

Published by: Ediciones UC

Stable URL: <http://www.jstor.com/stable/j.ctt1bhkqvz.14>

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact support@jstor.org.

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



JSTOR

Ediciones UC is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Introducción a la contaminación atmosférica*

Capítulo 11

Caso de estudio: Temuco-Padre Las Casas, IX Región

CASO DE ESTUDIO: TEMUCO-PADRE LAS CASAS, IX REGIÓN

En este capítulo final del texto se presenta como caso de estudio la situación de la zona urbana de Temuco-Padre Las Casas, IX Región de la Araucanía.

Desde 1997 se realizan mediciones de calidad del aire en la conurbación de Temuco y Padre Las Casas, en una primera etapa (1997-2000) correspondió a un monitoreo diagnóstico y desde mediados de 2000 a la fecha las mediciones han sido continuas con equipos oficiales. Los resultados del monitoreo permitieron dar cuenta de la superación de la norma primaria de MP_{10} , establecida en el DS 59, de 1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, y declarar la ciudad de Temuco y Padre Las Casas como zona saturada por material particulado respirable MP_{10} , en marzo de 2005.

De acuerdo a la Ley 19.300, una vez que una zona es declarada saturada por la superación de algún contaminante normado, corresponde la elaboración de un Plan de Descontaminación Atmosférico (PDA). En el caso de Temuco y Padre Las Casas, dicho plan deberá tener por objetivo disminuir las concentraciones de material particulado respirable, de tal forma que no se supere la normativa vigente, requiriéndose para ello de la generación de una serie de antecedentes necesarios para orientar y priorizar las medidas que se incluyan en dicho plan. Actualmente este instrumento se encuentra en reformulación para tomar en cuenta la promulgación de la norma de calidad ambiental para la fracción fina del material particulado respirable ($MP_{2.5}$).

Como ya se ha visto en el Capítulo 1, los promedios diarios y anuales de las concentraciones ambientales de material particulado respirable (MP_{10} y $MP_{2.5}$) medidas en Temuco-Padre Las Casas superan ampliamente las normas de calidad establecidas en Chile y en el extranjero, incluyendo las recomendaciones de la

OMS. Esta situación se debe principalmente al aumento del uso de leña como combustible para calefacción residencial, ya que se trata de un combustible bastante más barato que las alternativas disponibles en la zona (kerosene, gas licuado, gas natural).

11.1 Clima, morfología y meteorología

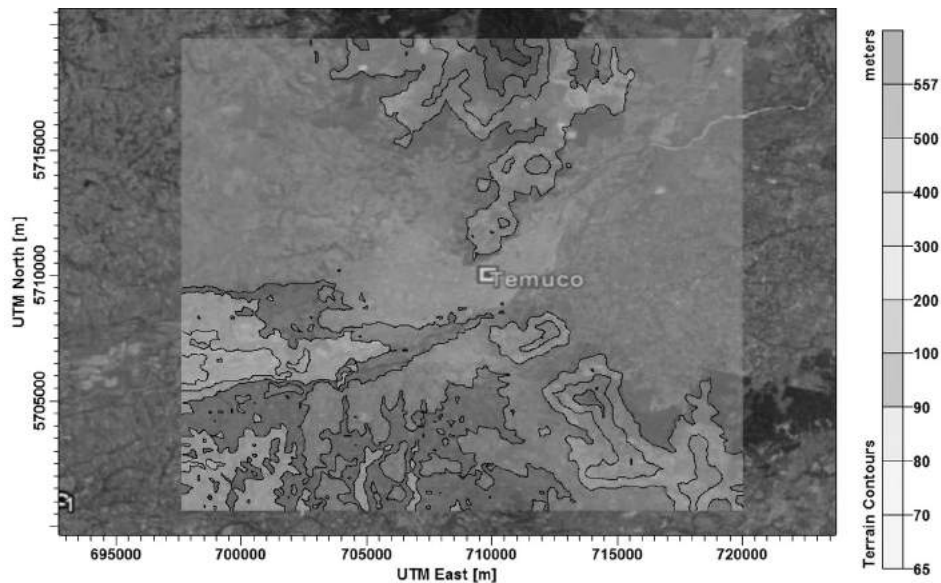
La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) describe a la Región de la Araucanía como una zona de clima templado lluvioso, con influencia mediterránea, cuya característica principal es que las precipitaciones se hacen presentes en todos los meses del año, concentrándose principalmente en el período invernal, siendo enero y febrero meses secos. El régimen térmico no sufre mayores alteraciones que las debidas a su distancia del mar. Su temperatura media anual es de 11 °C, con máximas medias en el mes más cálido de 22 °C y mínimas medias en el mes más frío de 3 °C.

FIGURA 11.1

Zona urbana de Temuco-Padre Las Casas, IX Región



FIGURA 11.2
Topografía de la zona urbana de Temuco-Padre Las Casas



La zona urbana de Temuco-Padre Las Casas se encuentra ubicada a aproximadamente $38^{\circ} 44' S$ y $72^{\circ} 35' W$, con una forma irregular que se extiende aproximadamente 10 km de este a oeste y 7 km de norte a sur, como se indica en la **Figura 11.1**. La **Figura 11.2** muestra la elevación del terreno en ese sector; en general, la zona urbana está ubicada en una planicie con poca pendiente de terreno, ya que los cerros no están habitados.

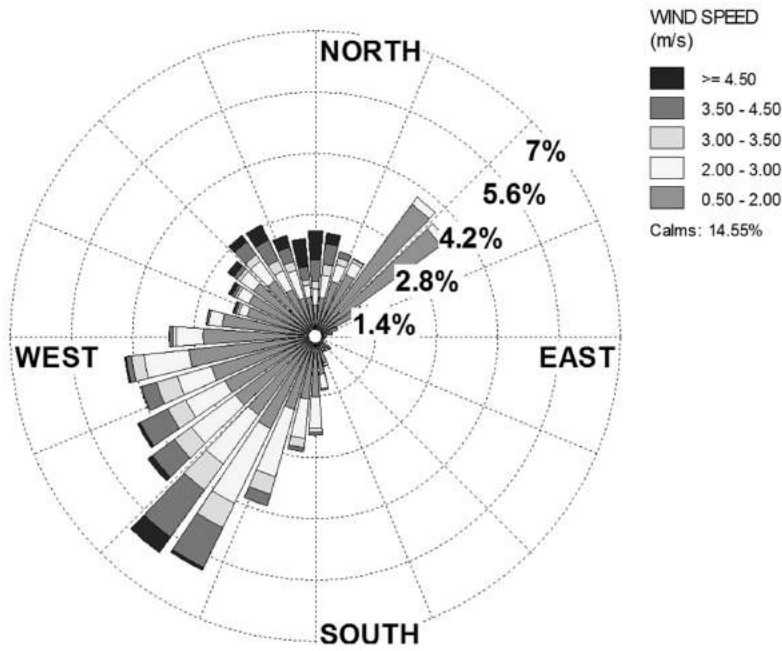
A continuación presentamos una descripción de la meteorología de superficie en la zona urbana, la que se basa en información meteorológica de la estación Las Encinas, para el año 2008, proporcionada por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA); la información válida supera 98% de cobertura del año seleccionado, por lo que se trata de información esencialmente completa. La siguiente tabla proporciona la ubicación de ese monitor.

TABLA 11.1
Ubicación de la estación de monitoreo meteorológico

Estación	Este [m]	Norte [m]	Latitud S	Longitud W
Las Encinas	706.761	5.708.427	$38^{\circ}44'55,06'' S$	$72^{\circ}37'2,18'' O$

La siguiente figura muestra la rosa de los vientos para todo el año, en la que se aprecia que el viento predominante es en dirección SW, siguiendo el desnivel de terreno en la zona, lo que muestra el efecto de la topografía en la meteorología superficial.

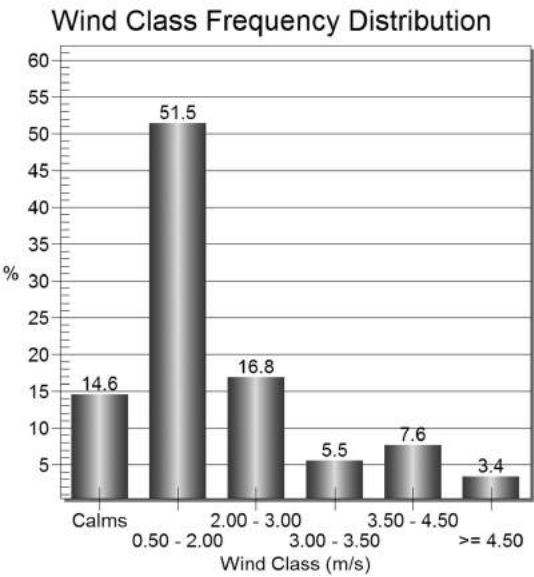
FIGURA 11.3
Rosa de los vientos estación Las Encinas, 2008.
Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



Con respecto a la intensidad del viento, se aprecia en la Figura 11.4 que 51,5% corresponde a velocidades entre los 0,5-2,0 m/s, y el 16,8% para valores entre 2,0 y 3,0 m/s; el porcentaje de calmas, es decir, velocidades menores a 0,5; m/s es 14,6%. Por último, los vientos sobre 4,5 m/s tienen una presencia baja, con 3,4% de las observaciones.

FIGURA 11.4

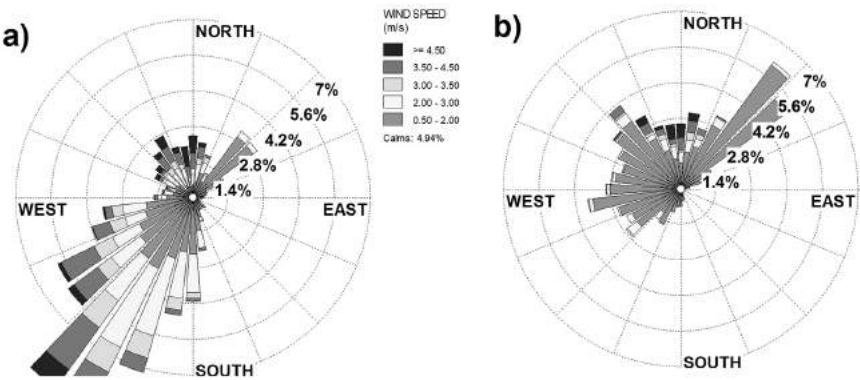
Histograma del viento medido en la estación Las Encinas, 2008.
Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



El efecto de la topografía sobre los vientos de superficie en la zona se puede distinguir más si consideramos la misma información de 2008, pero construyendo la rosa de los vientos en condiciones diurnas y nocturnas, como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 11.5

Rosa de los vientos: a) de día; b) de noche para la estación Las Encinas, 2008.
Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



Se constata que de día el viento es predominantemente SW debido al calentamiento del suelo y a la diferencia de elevación de terreno en la zona urbana, lo que promueve el desarrollo de corrientes ascendentes por convección natural. De noche se aprecia claramente un flujo de drenado en la dirección opuesta, con viento que desciende desde los cerros al norte de la ciudad y desde la zona más elevada, con un dirección predominante NE, pero también con aportes de componentes N y NNW. Además, el viento en promedio es más débil en magnitud de noche que de día, debido a que el forzamiento de la circulación del viento está asociado a fenómenos de tipo convectivo principalmente, aunque en condiciones de paso de sistemas frontales con precipitación este patrón de circulación va a cambiar y predominará el viento norte, por ejemplo, con mayores intensidades.

En relación a la estacionalidad de las variables meteorológicas en superficie, las siguientes figuras presentan el perfil diario de la velocidad del viento y de la temperatura del aire, respectivamente, para todos los meses del año. Se aprecia una estacionalidad importante, con un aumento de las velocidades y las temperaturas en los meses cálidos con respecto a la situación de los meses fríos. Esto es característico del clima de la zona.

Nótese que en los meses de otoño e invierno las condiciones son de un viento muy débil (que no dispersa eficientemente las emisiones nocturnas), acompañado de bajas temperaturas ambientales (que promueven un mayor consumo de leña para calefacción residencial). Ambos factores se potencian y explican cómo el crecimiento demográfico de la zona urbana ha estado acompañado de un alza en las concentraciones ambientales de material particulado.

FIGURA 11.6

Perfil diario mensual de la velocidad del viento medido en la estación Las Encinas, 2008.
Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>

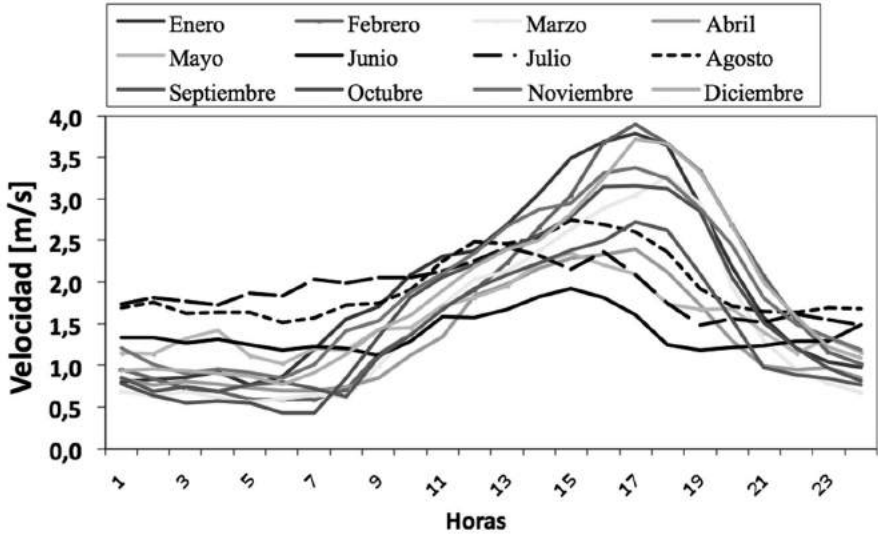
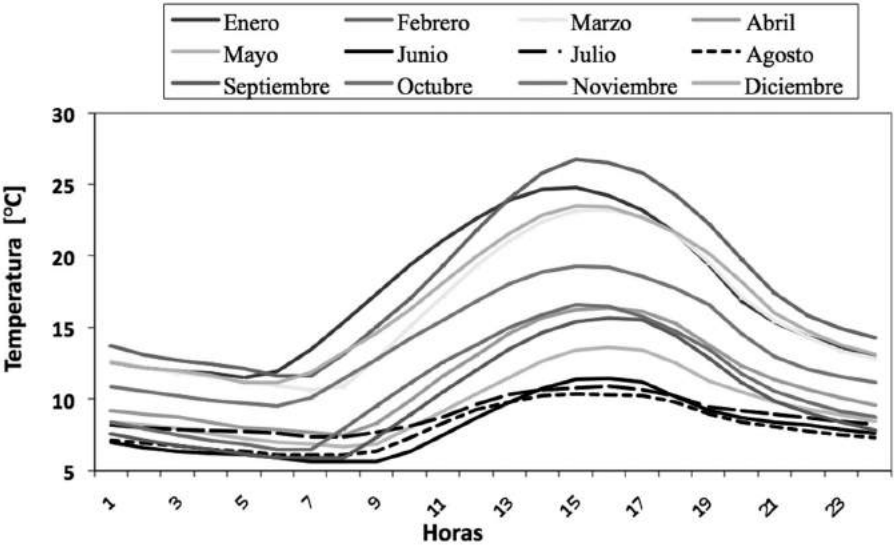


FIGURA 11.7

Perfil diario mensual de la temperatura medido en la estación Las Encinas, 2008.
Fuente: <http://sinca.mma.gob.cl/>



11.2 Escenarios de emisiones atmosféricas

Como escenario de emisiones consideramos los resultados del estudio “Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en las comunas de Temuco y Padre Las Casas”, realizado por DICTUC S.A., en 2008, para la Comisión Nacional del Ambiente (ahora Ministerio del Medio Ambiente). En ese estudio se construyó el inventario de emisiones atmosféricas para el 2005, y se proyectaron las emisiones para los escenarios 2010 y 2015, incluyendo en ambos casos medidas del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica. Aquí nos concentraremos en los contaminantes MP_{10} y $MP_{2.5}$.

El inventario de emisiones se construyó para las comunas de Temuco y Padre Las Casas, y se consideró las siguientes fuentes de emisión: fuentes puntuales; tipo grilla (o de área) y móviles. A continuación se detalla la metodología empleada y los resultados de esa estimación.

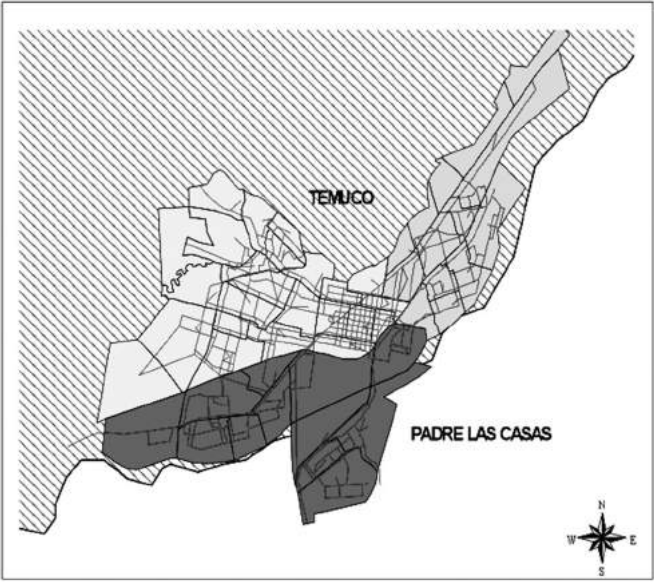
11.2.1 Emisiones de fuentes móviles

La metodología general para estimar las emisiones vehiculares en ruta consiste en estimar los niveles de actividad de las diferentes categorías vehiculares y asociarle a cada una de ellas un nivel de emisión promedio o un factor de emisión, como en la Ecuación 1.1. Para los vehículos motorizados, el nivel de actividad es representado, básicamente, por el kilometraje recorrido por el vehículo en el tiempo y área donde se desarrolla el inventario, mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramos por kilómetro recorrido, los que de modo general son altamente dependientes de la velocidad media de circulación.

El nivel de actividad asociado a este tipo de fuentes, puede ser obtenido de una manera desagregada y en detalle estimando directamente la información a partir de datos de flujo vehicular (modelos de transporte, conteos vehiculares, etc.), entre otras variables, generados por los modelos de transporte. En el caso de la información de la modelación de transporte, se utilizó la información entregada por la Secretaría de Planificación de Transporte (Sectra) para la red vial comprendida por Temuco y Padre Las Casas. Las corridas corresponden a escenarios de 2005. Para fines de cálculo *bottom-up*, se definió una zonificación de acuerdo a la encuesta de origen-destino de viajes de 1996, generándose la siguiente figura.

FIGURA 11.8

Zonificación de la zona urbana de Temuco-Padre Las Casas para fines de cálculo de las emisiones del sector transporte



	Sector 1 (Sectores Norte y Oriente)
	Sector 2 (Sectores Poniente, Norponiente, Centro y Centro Histórico)
	Sector 3 (Sectores Sur y Surponiente), según EOD 1996

La siguiente tabla resume los resultados del inventario de emisiones, por categoría de vehículo, para el escenario 2005. Nótese que no se ha incluido la emisión de polvo de calles suspendido por el paso de vehículos; por esto las emisiones de $MP_{2.5}$ del transporte son un alto porcentaje de las emisiones del MP_{10} . Además, las emisiones están agregadas, por lo que incluyen descargas por tubo de escape, partidas en frío y pérdidas evaporativas.

TABLA 11.2
Emisiones totales de vehículos en ruta (t/año), Temuco-Padre Las Casas, en 2005

	Categoría	Sub categoría	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NOx	COV
Fuentes móviles en ruta	Vehículos particulares	Vehículos particulares cat. Tipo 1	0,55	0,51	826,04	55,82	93,87
		Vehículos particulares no catalíticos	1,34	1,23	3.498,12	255,46	393,13
	Vehículos de alquiler	Vehículos de alquiler cat. Tipo 1	0,09	0,08	108,15	8,09	11,56
		Vehículos de alquiler no catalíticos	0,08	0,08	178,91	12,91	15,70
	Vehículos comerciales	Vehículos comerciales cat. Tipo 1	0,28	0,26	1.665,40	31,87	47,93
		Vehículos comerciales no catalíticos	0,66	0,60	2.906,95	162,74	433,99
		Vehículos comerciales diésel tipo 1	1,71	1,57	8,25	22,07	1,69
		Vehículos comerciales diésel tipo 2	0,04	0,04	0,46	0,23	0,05
		Buses particulares	1,07	0,98	5,05	16,63	1,42
	Camiones livianos	Camiones livianos diésel convencional	1,55	1,42	13,22	13,28	7,64
		Camiones livianos diésel tipo 1	0,55	0,50	3,60	5,06	3,12
		Camiones livianos diésel tipo 2	0,12	0,11	1,05	1,48	0,75
	Camiones medianos	Camiones medianos diésel convencional	3,14	2,89	13,56	28,90	7,86
		Camiones medianos diésel tipo 1	1,11	1,02	3,70	11,04	3,22
		Camiones medianos diésel tipo 2	0,25	0,23	1,09	2,90	1,11
	Motos	Motos de dos tiempos convencional	-	-	11,45	0,02	5,20
		Motos de cuatrotiempos convencional	-	-	38,22	0,21	2,81
	Taxis colectivos	Taxis colectivos catalíticos tipo 1	0,21	0,20	301,12	16,41	30,84
		Taxis colectivos no catalíticos	0,01	0,01	43,06	2,29	3,99
		Taxis colectivos otros	2,25	2,07	7,55	5,31	2,12
	Camiones pesados	Camiones pesados diésel convencional	0,56	0,51	1,98	9,18	1,10
		Camiones pesados diésel tipo 1	0,18	0,16	0,54	2,48	0,27
		Camiones pesados diésel tipo 2	0,04	0,04	0,25	1,01	0,14
	Buses licitados	Buses licitados urbanos diésel vtt	28,32	26,06	134,83	388,96	44,99
		Buses licitados urbanos diésel tipo 1	5,60	5,16	31,57	127,49	15,80
		Buses licitados urbanos diésel tipo 2	3,40	3,13	24,91	89,83	14,55
		Total fuentes móviles en ruta	53,1	48,9	9.829,0	1.271,6	1.144,8

11.2.2 Fuentes móviles fuera de ruta

Los tipos de maquinaria terrestre considerada son aquellos asociadas a maquinaria agrícola y a maquinaria de construcción que operan dentro de las comunas de Temuco y Padre Las Casas. Para el cálculo de emisiones de fuentes móviles fuera de ruta, se utilizó la metodología EPA descrita en el documento

“EPA420-P-04-009, April 2004, NR-009c, Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling-Compression-Ignition”. Estas fuentes serán consideradas como fuentes de zona, debido a la dificultad de localizar geográficamente el lugar de emisión. Esta metodología especifica la siguiente ecuación:

$$E_{i,k} = EF_i * T_k * C_k * W \qquad \text{Ecuación 11.1}$$

- Donde:
- $E_{i,k}$: Emisiones del contaminante i producidas por un vehículo tipo k [g]
 - EF_{ik} : Factor de emisión del contaminante i para los vehículos tipo k [g/hp-h]
 - T_k : Tiempo de operación promedio de los vehículos del tipo k [h]
 - C_k : Porcentaje de carga (respecto a la potencia nominal) durante la operación normal de los vehículos tipo k
 - W : Potencia nominal [hp]

Sobre los niveles de actividad, la base de información para fuentes móviles fuera de ruta es la siguiente:

- Maquinaria agrícola existente para las comunas en estudio según fuente INE.
- Maquinaria promedio utilizada en obras de construcción y superficie edificada para las comunas de Temuco y Padre Las Casas (información entregada por profesionales del área de la construcción y registros INE, respectivamente).

Las siguientes tablas resumen los cálculos hechos para el 2005.

TABLA 11.3
Total emisiones de tractores agrícolas, en 2005 (t/año)

Comuna	Nº Tractores	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NOx	HC	MP
Padre Las Casas	32	1,65	1,52	8,59	9,11	1,48	1,65
Temuco	60	3,09	2,84	16,11	17,09	2,77	3,09
Total	92	4,74	4,36	24,70	26,20	4,25	4,74

TABLA 11.4
Total emisiones maquinaria de construcción, en 2005 (t/año)

Comuna	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	HC	PTS
Padre las Casas	0,04	0,04	0,24	0,32	0,03	0,04
Temuco	0,83	0,81	3,87	9,76	0,74	0,83
Total	0,87	0,85	4,11	10,08	0,77	0,87

11.2.3 Combustión residencial de GLP, kerosene y gas propano

La combustión residencial se asocia a las emisiones atmosféricas que se producen al quemar algún tipo de combustible en las residencias particulares, ya sea para calefacción, calentar agua o cocción de alimentos. Los combustibles que se consideraron son: kerosene, gas licuado (GLP) y gas propano.

Las emisiones dependen del tipo de combustión, la composición del combustible y del tipo de equipo donde se produce la combustión. Las emisiones se determinan al multiplicar el consumo de combustible por un factor de emisión, de acuerdo a la siguiente expresión general:

$$E = FE \cdot Na$$

Ecuación 11.2

- Donde:
- E: Emisiones del contaminante en estudio [t/año]
 - FE: Factor de emisión del contaminante en estudio, en función del tipo de combustible [t/kg combustible]
 - Na: Nivel de actividad, definido en este caso por el consumo anual de combustible [kg/año]

Los factores de emisión para gas licuado y kerosene, provienen de dos fuentes de información; una corresponde al AP-42 de la EPA y la otra a la Agencia Ambiental de California (CARB). Estos valores se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 11.5
Factores de emisión por combustión residencial

Combustible	TOC ⁴	CO	NO _x	SO _x ³	MP	Unidad
GLP ¹	87,47	221,68	1.090,42	1,68	33,55	Kg/1.000 m ³
Kerosene ²	298,73	599,13	2.156,88	4.313,76	299,57	Kg/1.000 m ³

1: Fuente: AP-42, EPA. 2: Fuente: CARB. 3: Corresponde a SO₂. 4: Compuestos orgánicos totales, lo cual en términos del inventario de emisiones se asocia a compuestos orgánicos volátiles.

El nivel de actividad requerido para la estimación de emisiones corresponde al consumo anual para cada combustible. En el caso del GLP y kerosene se utilizan las estadísticas de la SEC al 2005 que aportan datos de consumo a nivel regional tanto para combustibles líquidos como gaseosos. Se consultó la cobertura de la empresa Intergas, que informó red solo en la comuna de Temuco, con un suministro de gas propano diluido, el que está incluido en el reporte de consumo de GLP de la SEC.

Los valores registrados por la SEC y utilizados para el cálculo de emisiones se reportan en la siguiente tabla:

TABLA 11.6
Consumo residencial de combustibles 2005

Combustible	Comunas	Consumo (t/año)
GLP	Padre Las Casas	6.556
	Temuco	1.582
Kerosene	Padre Las Casas	799
	Temuco	193

Fuente: SEC 2005

Aplicando la metodología antes descrita, se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 11.7
Emisión de contaminantes asociados a la combustión residencial (t/año), 2005

Comb.	Comuna	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	VOC	SO _x	NH ₃
GLP	Temuco	0,38922	0,38922	0,14643	0,49683	0,06983	0,00114	0,00210
	P. Las Casas	0,09392	0,09392	0,06293	1,05921	0,09504	0,00042	0,00082
Kerosene	Temuco	0,00028	0,00028	0,00056	0,00203	0,00028	0,00336	0,00007
	P. Las Casas	0,00007	0,00007	0,00014	0,00049	0,00007	0,00081	0,00002
Total		0,48349	0,48349	0,21006	1,55856	0,16522	0,00573	0,00301

Nota: Se le incorporaron decimales para visualizar emisiones con valores muy inferiores a 1.

11.2.4 Combustión residencial de leña

Las referencias internacionales⁸⁷ señalan que el material particulado emitido durante la combustión residencial de leña corresponde en 96% en masa a MP₁₀ y en 93% en masa a MP_{2,5}. Las partículas están compuestas principalmente por partículas orgánicas y carbono elemental (hollín), y una pequeña fracción corresponde a sales inorgánicas como KCl, K₂SO₄, entre otras. Por ejemplo, resultados de emisiones en artefactos de combustión abierta, indican que cerca de 74% de MP_{2,5} corresponde a carbono orgánico y entre 1% y 18% a carbono elemental; el resto son sales que incluyen una combinación de sodio, manganeso, potasio, calcio, zinc, amonio, sulfatos, carbono y nitrato, dependiendo de la especie de madera.

Las características más importantes de la leña que determinan la producción de calor son su contenido de humedad y densidad. Al comparar el contenido de energía entre maderas blandas de las duras, estas últimas tienen un valor energético mayor (19,2 MJ/kg) que las maderas blandas (18,2 MJ/kg). Las maderas duras toman un mayor tiempo en quemarse y producen una mayor cantidad de cenizas que las maderas blandas. Por su parte, el contenido de humedad en la leña requiere de mayor energía para ser evaporada, reduciendo la eficiencia de la combustión y el valor energético del combustible, aumentando las emisiones. En términos generales, las principales conclusiones de estudios realizados a nivel nacional⁸⁸ determinan que la humedad de la leña

⁸⁷ “Reconciling Urban Fugitive dust Emissions Inventory and Ambient Sources Contribution Estimates”, DRI, Desert Research Institute, 1999.

⁸⁸ Estudio: “Priorización de medidas de reducción de emisiones por uso residencial de leña para la gestión de la calidad del aire en Temuco y Padre Las Casas”, Desarrollado por la Universidad de Concepción para Conama, en 2002.

es el parámetro que más incide en las emisiones de contaminantes y que el tipo de especie no influye mayormente en el poder calorífico y solo afectaría la densidad y por lo tanto, la velocidad de quemado.

11.2.4.1 Factores de emisión de estufas chilenas

Dentro del informe del proyecto COSUDE⁸⁹, se entregan antecedentes de mediciones de emisiones efectuadas a estufas típicas chilenas medidas en Suiza por expertos de dicho país, obteniéndose factores de emisión para distintos tipos de operación del artefacto de calefacción.

Respecto a las conclusiones del estudio, destacan los resultados obtenidos para la estufa tradicional chilena (“doble cámara”), para la que se señala que las emisiones de MP son ampliamente sensibles a los distintos tipos de operación. Entre una operación ideal y típica, las emisiones aumentan en un factor de 12 a 60. Entre una operación mala y típica, aumentan de un factor de 5 a 26.

Con relación a factores de emisión de MP para la estufa tradicional chilena, se tiene:

- Para una condición ideal de operación con 12% de humedad de leña, el factor de emisión corresponde a 0,6 g/kg de leña seca.
- Para una condición típica de operación con 20% de humedad de leña, el factor de emisión corresponde a un rango entre los 3,0 y 14,4 g/kg de leña seca.
- Para una condición mala de operación con 20% de humedad de leña, el factor es de 79,3 g/kg de leña seca.

La tabla siguiente presenta los valores de mediciones obtenidos por el estudio suizo:

⁸⁹ Nussbaumer, 2006. Results from Tests on Wood Stoves and revised Recommendations for Emission Limit Values for Chile. Report for CONAMA and COSUDE. Zürich, 10. May 2006. Disponible en el expediente público de la norma.

TABLA 11.8
Resultados de las mediciones del estudio suizo comparativo

Operación	Humedad	Estufa chilena		Estufa suiza de 2 etapas		Observaciones
		Carga troncos leña	MP [mg/m ³] normalizado a 13% O ₂	Carga troncos leña	MP [mg/m ³] normalizado a 13% O ₂	
Operación ideal con trozos de leña pequeños y secos, 30% carga. No incorpora en la medición el aporte de contaminantes que se da durante el encendido del artefacto.	12%	2 x 750 g	20	Carga Completa	10 - 20	Para efectos de pruebas se mantuvo el monitoreo continuo de CO, con objeto de mantener las condiciones de la combustión. Por lo tanto, esta operación no es practicable en la realidad.
Operación ideal con trozos de leña pequeños y secos, 30% carga. Incorpora en la medición el encendido.	12%	2 x 750 g	50	Carga Completa	20 – 30	
Operación típica para calefacción, carga completa.	20%	3 x 1.500 g	250 – 1.200 (125 – 600)	Carga completa	30-50 (30-50)	La combustión en dos etapas permite una reducción de aproximadamente 90%.
Operación típica para calefacción, carga completa	33%	3 x 1.500 g	500 – 1.200 (250 – 600)	Carga completa	60-150 (50-100)	La combustión en dos etapas permite una reducción de aproximadamente 50%. No obstante se observa la influencia de la humedad de la leña.
Mala operación, ingreso de aire cerrado durante operación. Siguiendo instrucciones del fabricante.	20%	3 x 1.500 g	6.600 (5.500)	Carga Completa	No es posible operar	

NOTA: Emisiones de MP (mg/m³) con 13% en volumen de O₂, de acuerdo al método de US-EPA; los valores entre paréntesis siguen el método VDI.

Se estima adecuado utilizar como valores base para una operación típica con leña de hasta 20% de humedad en base húmeda (considerada leña seca), los valores obtenidos por el estudio suizo para emisiones de PM, desarrollado por Nussbaumer 2006, para el caso de calefactores de combustión lenta de doble cámara (tabla anterior). Para las emisiones de cocinas a leña se utilizó el factor sugerido por la Universidad de Concepción en el estudio antes citado como factor base para operación típica.

11.2.4.2 Encuesta para estimar el consumo residencial de leña

La siguiente tabla resume los consumos de leña obtenidos a partir de los datos procesados provenientes de la encuesta de leña efectuada en Temuco y Padre Las Casas en el marco del citado estudio. Estos datos se utilizaron para efectuar el cálculo de emisiones presentado en los párrafos posteriores.

TABLA 11.9
Consumo de leña por tipo de artefacto, Temuco y Padre Las Casas, 2007

	Temuco(m³)	PLC (m³)	Total (m³)
1. Cocina a leña	214.392	36.595	250.987
2. Combustión lenta-calefactor a leña sin templador	133.328	8.901	142.229
3. Combustión lenta-calefactor a leña con templador	119.462	4.945	124.407
4. Salamandra	44.798	10.880	55.678
5. Chimenea tradicional	5.333	989	6.322
6. Braseró	2.133	989	3.122
7. Insert	1.067	0	1.067
8. Horno de barro o ladrillo	0	0	0
9. Otro	3.200	0	3.200
Total	523.713	63.299	587.012

Fuente: Encuesta de leña 2007, efectuada en el marco del citado estudio de DICTUC S.A.

11.2.4.3 Emisiones por consumo residencial de leña

Proyectando los datos anteriores al 2005, se obtuvo la siguiente estimación de emisiones. Nótese que el $MP_{2,5}$ constituye una elevada proporción del MP_{10} .

TABLA 11.10
Emisiones totales combustión residencial de leña (t/año) 2005

	Temuco	Padre Las Casas	Total
MP	4.978	632	5.610
MP10	4.769	606	5.375
MP _{2,5}	4.635	588	5.223
CO	50.671	6.255	56.926
NOX	304	36	340
COV	30.091	4.803	34.894
SO ₂	40,6	4,9	45,5

11.2.5 Quemas agrícolas e incendios forestales

Las quemas agrícolas son procesos de combustión de menor escala como quema de rastrojos, de ramas y materiales leñosos. Durante la combustión de materia vegetal, ya sea producto de incendios forestales o quemas, se incorporan a la atmósfera una gran cantidad de sustancias contaminantes, siendo las más importantes: monóxido de carbono, compuestos orgánicos gaseosos y material particulado, principalmente carbón no quemado. En las quemas de desechos vegetales se emiten bajas cantidades de óxidos de nitrógeno y se generan grandes cantidades de dióxido de carbono y vapor de agua.

La Corporación Nacional Forestal (Conaf) es la encargada de fiscalizar, prevenir y controlar los incendios forestales y quemas agrícolas, por lo cual lleva un registro tanto del número de incendios forestales como de las quemas agrícolas, entregando la extensión de cada siniestro en hectáreas consumidas, separadas por comuna. La tabla siguiente muestra la superficie afectada por quemas agrícolas autorizadas por comuna.

TABLA 11.11
Hectáreas consumidas por quemas agrícolas, escenario 2005

Comuna	Superficie quemada (ha)			
	Total	Avena	Cebada	Trigo
P Las Casas	1.155	277	60	817
Temuco	2.180	523	113	1.543

Fuente: Temporada 2005, registros Conaf 2006.

Con esto, y usando factores de emisión de CARB⁹⁰, se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 11.12
Emisiones de quema agrícola total (t/año), 2005

Comuna	Total					
	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO _x	SO ₂	VOC	CO
P Las Casas	31,33	29,87	4,93	2,13	21,54	332,09
Temuco	59,14	56,38	9,30	4,02	40,66	626,89
TOTAL	90,47	86,25	14,23	6,15	62,21	958,99

11.2.6 Construcción y demolición

La metodología para la estimación de emisiones se basa en un factor de emisión, en el tiempo en que demora la realización de la obra y en la superficie de terreno intervenida, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = A * T * FE \qquad \text{Ecuación 11.3}$$

Donde:
E: emisiones de material particulado [kg/año]
A: área intervenida en la construcción [m²]
T: tiempo de duración de la obra [mes]
FE: factor de emisión de material particulado [kg/m²-mes]

⁹⁰ Fuente: <http://o3.arb.ca.gov/ei/areasrc/fullpdf/full7-17.pdf>

El factor de emisión que se usa es el determinado por la CARB Section: 7.7 “Building Construction Dust” (Revised September 2002) presentado en la siguiente tabla:

TABLA 11.13
Factores de emisión para construcción de edificios

MP ₁₀ [kg/m ² -mes]	PTS [kg/m ² -mes]
0,0247	0,0504

Fuente: CARB Section: 7.7 “Building Construction Dust” (Revised September 2002)

Los m² de superficie construida para el 2005, fueron obtenidos a través de las estadísticas de edificación reportada por el INE, con detalle comunal. La siguiente tabla muestra los valores considerados:

TABLA 11.14
Metros cuadrados construidos para el 2005

Comuna	m ² construidos
Temuco	282.757
Padre Las Casas	18.537
Total	301.294

Fuente: Anuario de Edificación 2005, INE.

Aplicando la metodología y supuestos se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 11.15
Emisiones de MP₁₀ y PTS, provenientes del polvo fugitivo por actividades de construcción de edificaciones, en 2005

Comunas	Emisiones (Ton/año)	
	MP ₁₀	PTS
Temuco	41,9	85,50
Padre Las Casas	2,74	5,60
Total	44,65	91,11

11.2.7 Polvo resuspendido de calles pavimentadas

La metodología está presentada en la última edición del AP-42, correspondiente a diciembre de 2003.⁹¹

$$Epa = Ed(1 - p/4N) \quad \text{Ecuación 11.4}$$

$$Ed = e * F * L \quad \text{Ecuación 11.5}$$

Donde:

Epa: tasa de emisión anual (o del período bajo estudio) de partículas para el tramo de calle pavimentada [g/año].

Ed: tasa de emisión diaria de partículas para el tramo de calle pavimentada [g/día].

p: días con precipitaciones mayores de 0,254 mm durante el período considerado.

N: número de días del período de estudio (365 en el caso anual).

Ed: tasa de emisión diaria por tramo [g/día].

e: factor de emisión de partículas por calles [g/vehículo-km].

F: flujo vehicular diario [vehículos/día].

L: longitud del tramo [km].

Los factores de emisión de polvo desde calles pavimentadas corresponden a las versiones de diciembre de 2003 del AP-42 de la EPA relativo a fuentes misceláneas de emisiones de polvo fugitivo desde calles pavimentadas.⁹² El factor de emisión se puede obtener de la siguiente forma:

$$e = k \left(\frac{Sp}{2} \right)^{0,65} \left(\frac{W}{3} \right)^{1,5} \quad \text{Ecuación 11.6}$$

Donde:

Sp: contenido de material fino, fracción de polvo de diámetro ≤ 75 micrones [g/m²].

k: constante, depende del tamaño de partícula a considerar [g/VKT].

W: peso promedio de la categoría de vehículo en movimiento [t].

C: factor de emisión de ajuste, asociado a emisiones de escape y desgaste de frenos y neumáticos.

⁹¹ <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf>

⁹² <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf>

El valor de la constante k varía según el tamaño de partícula como se indica en la siguiente tabla:

TABLA 11.16
Valores de k , según tamaño de partícula

Tamaño de partícula	Valores de k en [gr/VKT].
MP _{2,5}	0,66
MP ₁₀	4,6
MP ₁₅	5,5
MP ₃₀ *	24

Fuente: AP42. * Se asocia a PTS.

Sobre la carga de sedimentos de material fino de la superficie del camino, debido a la carencia de estudios sobre el tema en la mayoría de las ciudades de Chile, se evaluará considerar los valores por defecto del AP-42 Capítulo 13, Cuadro 13.2.1-3, valores que se indican en la siguiente tabla:

TABLA 11.17
Carga de finos

Flujo vehicular (v/día)	≤ 500	$> 500 \leq 10.000$	> 10.000
Carga de finos (g/m ²)	0,6	0,11*	0,03

* En AP-42 se encuentra separado en flujos entre 500-5.000 y 5.000-10.000, con valores de 0,2 y 0,06, respectivamente.

En la siguiente tabla se presentan las emisiones de polvo resuspendido proveniente de calles pavimentadas, estimadas mediante el modelo de emisiones vehiculares Modem. Las emisiones dentro de este sistema fueron calculadas por agrupación de sectores estratégicos y, por lo tanto, las emisiones son reportadas para los tres sectores en los cuales se efectuó dicha agrupación.

TABLA 11.18
Emisiones de PTS, MP_{10} y $MP_{2.5}$ desde calles pavimentadas, Temuco
y Padre Las Casas, en 2005

Comuna	PTS	MP_{10}	$MP_{2.5}$
Sector Temuco centro, poniente y norponiente	738	141	34
Sector Temuco nororient	324	62	15
Sector Temuco surponiente y Padre Las Casas	727	139	33
Total	1.789	342	82

11.2.8 Polvo resuspendido de calles no pavimentadas

La tasa anual de emisiones para tramos de calle sin pavimentar, se estima como el producto entre la tasa de emisión diaria y el número de días con precipitaciones menores de 0,25 mm, es decir:

$$E_{pa} = E_d (365 - (n/24 + 1) \cdot p) \quad \text{Ecuación 11.7}$$

- Donde:
- E_{pa} : tasa de emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [g/año].
 - E_d : tasa de emisión diaria de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [g/día].
 - p : días al año con precipitaciones mayores de 0,25 mm.
 - n : número de horas que demora en secar la calle, después de la última lluvia.

Para el cálculo de la emisión específico se utiliza la siguiente expresión:

$$E_d = E_e * F * L \quad \text{Ecuación 11.8}$$

- Donde:
- E_d : tasa de emisión diaria de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [g/día].
 - E_e : factor de emisión de partículas por calle (gr/vehículo-km).
 - F : flujo vehículo diario (vehículo/día).
 - L : longitud del tramo (km).

La última versión del AP-42 de la EPA, correspondiente al 2003, señala la siguiente expresión para determinar el factor de emisión a evaluar:

$$e = \frac{k \left[\frac{s}{12} \right]^a \left[\frac{w}{3} \right]^b}{\left[\frac{m}{0,2} \right]^c}$$

Ecuación 11.9

- Donde:
- e: factor de emisión [kg/km-vehículo recorrido].
 - k: factor de corrección por tamaño de partículas [adimensional].
 - s: contenido de partículas finas en la superficie de la calle [%].
 - w: peso promedio de los vehículos [toneladas].
 - m: contenido de humedad de la superficie [%].
 - a, b, c: constantes.

La información de la red vial del país está bajo la gestión de dos instituciones públicas: el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Ministerio de la Vivienda y Urbanismo (Minvu). La información del Minvu respecto a los kilómetros de calles sin pavimentar se obtienen de los registros del XV llamado a concurso del Programa de Pavimentos Participativos, donde se indica el déficit al 2005 y un listado de los proyectos en lista de espera por comuna. La información de la red MOP de caminos sin pavimentar, fue facilitada por el Departamento de Gestión Vial del MOP, en donde se indica la longitud y ubicación de la red vial sin pavimentar por comuna. La tabla a continuación resume las emisiones obtenidas para las comunas bajo estudio.

TABLA 11.19
Emisiones de MP₁₀ de caminos sin pavimentar, 2005

Comuna de estudio	Sin pavimentar	MP ₁₀
	km lineales	t/año
Padre Las Casas	187,4	1.289,9
Temuco	562,3	3.870,7
Total	749,7	5.160,6

11.2.9 Fuentes fijas

Para el desarrollo del inventario de emisiones de fuentes fijas industriales y comerciales se utilizaron diversas fuentes de información: catastros de fuentes, bases de datos del Seremi de Salud, declaración de emisiones DS N° 138, estudios previos en la zona y visitas a terreno en compañía de autoridades locales.

La siguiente tabla resume los factores de emisión considerados en la estimación de emisiones:

TABLA 11.20

Factores utilizados en estimación de emisiones en calderas y procesos en base al consumo de combustible (Unidad del factor: Kg emisión/ Kg combustible)

N°	Tipo de Combustible Genérico	MP	CO	NOx	COT	SOx	NH ₃	Source Category
1	Carbón	0,00310	0,00300	0,00375	0,00003	0,05510	8,6E-04	Carbón bituminoso
2	Madera	0,00320	0,00680	0,00075	0,00011	0,00004	1,1E-03	Desecho de leña en proceso
3	Petróleo N° 6	0,00125	0,00061	0,00676	0,00003	0,02364	1,1E-04	Petróleo N° 6
4	Petróleo N° 5	0,00089	0,00063	0,00691	0,00004	0,01990	1,2E-04	Petróleo N° 5
5	Petróleo N° 2	0,00020	0,00071	0,00283	0,00005	0,00420	1,4E-04	Petróleo N° 2
6	Gas	0,00013	0,00076	0,00441	0,00008	0,00001	6,6E-05	50% propano + 50% butano
7	Gas natural	0,00017	0,00189	0,00226	0,00012	0,00028	3,9E-08	Nat. Gas Comb, Small Industrial Boilers

Fuente: Factores calculados a partir de factores EPA.

Los niveles de actividad requeridos para el cálculo de emisiones de fuentes estacionarias puntuales incluyen tres tipos de parámetros básicos, que dependen de la disponibilidad de información y de la metodología utilizada:

- Consumo de combustible
- Materias primas utilizadas en el proceso
- Producción

La información sobre el nivel de actividad y la necesaria para caracterizar la fuente se obtuvo de tres formas:

- Información existente en la base de datos del inventario 2000, desarrollado por CENMA.

- Información proveniente del Seremi de Salud de IX Región.
- Visitas a terreno realizadas por especialistas de DICTUC S.A., recopilación de información sobre el uso de materias primas y producción durante el 2005.

Las visitas a terreno fueron realizadas a las empresas más significativas en emisiones, tomando en cuenta principalmente opinión experta de los Servicios de Salud de la región. Debido a las limitaciones propias del estudio, no fue posible realizar un catastro de todas las calderas ni de las panaderías de la región. Se priorizó la incorporación de las panaderías y calderas de calefacción que utilizan leña como combustible, y las fuentes visitadas fueron georreferenciadas utilizando un posicionador satelital (GPS).

La siguiente tabla resume los resultados de la estimación de emisiones. De acuerdo a los resultados del inventario desarrollado, las comunas de Temuco y Padre Las Casas, se caracterizan por no tener fuentes de gran tamaño que puedan ser consideradas megafuentes. La mayoría de las fuentes existentes en estas comunas pueden ser consideradas pequeñas, destacando la gran cantidad de calderas de calefacción.

TABLA 11.21
Resumen de emisiones en 2005 de fuentes estacionarias puntuales
de Temuco y Padre Las Casas [t/año]

Clasificación de inventario	MP ₁₀	CO	NO _x	COV ₃	SO _x	NH ₃
Caldera calefacción	38,8	83,74	22,54	1,5	11,1	13,2
Fabr. de artículos y muebles de madera	0,5	0	0	0,3	0,0	0,0
Fabricación de hormigón y manejo de áridos	39,4	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricación de madera elaborada	0,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricación de artículos plásticos	0,0	0	0	33,0	0,0	0,0
Faenamiento de animales	0,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Industria de artes gráficas	0,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Procesamiento de granos	85,7	0	0	0,0	0,0	0,0
Productos de hierro y acero	1,6	10,08	0,238	0,0	0,1	0,1
Panadería	4,2	8,481	2,116	0,2	1,7	1,4
Caldera industrial	66,1	126,7	34,55	1,9	331,3	22,6
Total general	236,3	229	59,44	36,9	344,3	37,3

11.2.10 Resumen de emisiones atmosféricas, en 2005

TABLA 11.22
Resumen inventario de emisiones, fuentes estacionarias y móviles,
escenario 2005, Temuco y Padre Las Casas

Fuentes estacionarias y móviles escenario 2005							
Categoría de fuente t/año	MP ₁₀ t/año	MP _{2,5} t/año	CO t/año	NOx t/año	COV t/año	SOx t/año	NH ₃
Industria	236,3	0,0	229,0	59,4	36,9	344,2	37,3
Combustión de leña residencial	5.374,6	5.223,1	56.925,8	340,5	34.893,8	45,6	NE
Otras combustión residencial	0,5	0,5	0,2	1,6	0,2	0,0	0,0
Quemas agrícolas	90,5	86,3	959,0	14,2	62,2	6,2	0,0
Incendios forestales	30,9	26,3	299,8	9,8	20,6	3,0	3,0
Otras fuentes	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Total estacionarias	5.732,9	5.336,3	58.413,9	425,5	35.013,6	398,9	40,4
Taxibús	37,8	34,3	191,3	606,3	75,3	29,3	0,1
Otros buses	1,1	1,0	5,1	16,6	1,4	0,5	0,0
Camiones	7,7	6,9	39,0	75,3	25,2	6,1	0,0
Veh. livianos catalíticos	4,5	1,0	2.900,7	112,2	184,2	4,6	17,8
Veh. livianos no catalíticos	3,6	1,9	6.627,0	433,4	846,8	2,2	0,2
Veh. livianos diésel	4,4	3,7	16,2	27,6	3,9	5,7	0,0
Motos	0,0	-	49,7	0,2	8,0	0,0	0,0
Fuera de ruta	5,6	5,2	28,8	36,3	5,0	-	-
Total móviles	64,8	54,1	9.857,8	1.307,9	1.149,8	48,5	18,2
Total móviles y estacionarias	5.797,6	5.390,3	68.271,7	1.733,4	36.163,5	447,4	58,6

Cabe hacer notar que no hemos incluido en la tabla anterior la estimación de polvo resuspendido de calles, ya que esos valores están sujetos a mucha incertidumbre con relación a los valores estimados para las demás fuentes de emisión.

Por ejemplo, en la tesis del magíster en ciencias de la ingeniería: “Dispersión del MP₁₀ en Temuco: construcción del escenario base y análisis del cumplimiento de la normativa ambiental”, realizada por Daniela Stocker Tolosa el 2010, se hizo una corrección, usando un modelo de dispersión, del inventario de emisiones 2005 para el MP₁₀, obteniéndose que el valor total de 5.800 t/año de MP₁₀ es consistente con las observaciones de la red de monitoreo de calidad del aire en la zona para el 2006, aunque su distribución espacial cambia con respecto al inventario aquí presentado.

Si a la emisión total de MP_{10} en la tabla anterior le añadimos las emisiones de polvo fugitivo (principalmente de calles sin pavimentar), obtendríamos una emisión total de MP_{10} de aproximadamente 11.400 t/año, lo cual es claramente excesivo e indica una sobrestimación de las emisiones de MP_{10} en el inventario 2005. Ciertamente la citada comparación indica una gran incertidumbre en las emisiones de MP_{10} provenientes de las categorías que más aportan al inventario: uso de leña residencial y polvo resuspendido de las calles.

La pregunta que surge acá es por qué ambas emisiones poseen tanta incertidumbre, y la respuesta está tanto en los factores de emisión como en los niveles de actividad. En el caso de la leña su consumo se estima mediante encuestas a los habitantes, ya que el mercado de la leña es informal; además, el factor de emisión de cada equipo calefactor (o cocina) depende de múltiples factores como humedad y tamaño de la leña, velocidad de quemado, diseño del equipo, definición del nivel de confort térmico y nivel de aislación térmica en las viviendas. Todos estos factores contribuyen a que la estimación sea imprecisa, ya que es mucha la variabilidad entre viviendas.

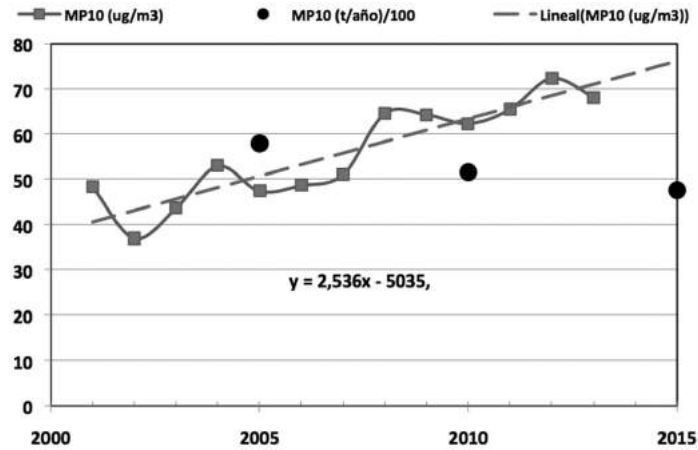
Por otra parte, la emisión de polvo resuspendido de calles sin pavimentar está dada por correlaciones experimentales desarrolladas por la EPA de EE.UU. que poseen una gran dispersión y también dependen de parámetros que no se conocen en forma precisa: humedad y contenido de finos en las calles, tráfico de vehículos (especialmente vehículos pesados) por las calles sin pavimentar, es decir, gran variabilidad entre arcos de la red vial.

11.2.11 Tendencias de los inventarios de emisiones atmosféricas

Usando la información del citado estudio de DICTUC S.A., es posible comparar las tendencias en las concentraciones ambientales de MP_{10} medidas en la zona urbana y las estimaciones de emisiones en los escenarios 2005, 2010 y 2015. Para estos fines se considerará solamente las emisiones de fuentes incluidas en la tabla anterior (para el 2005), sin incluir la componente de polvo fugitivo, debido a que se considera que está muy sobrestimada y posee mucha incertidumbre. La siguiente figura muestra una comparación de la tendencia del MP_{10} medido en la estación Las Encinas y los inventarios de emisiones desarrollados por DICTUC S.A. Se aprecia que entre 2001 y 2013 las concentraciones anuales siguen una tendencia creciente en el tiempo, mientras que los inventarios de emisiones tienen, por el contrario, una tendencia decreciente entre 2005 y 2015. Nótese que en ese tipo de gráficos solo es posible comparar tendencias temporales.

FIGURA 11.9

Comparación de la evolución del MP10 anual medido en la estación de monitoreo Las Encinas y los inventarios de emisiones atmosféricas estimados por DICTUC S.A.



La explicación para esta notoria discrepancia se debe a los supuestos que se hicieron para proyectar el escenario 2005 a los años 2010 y 2015, incluyendo medidas a ser implementadas en el PDA de Temuco-Padre Las Casas, las que fueron estimaciones claramente optimistas. Probablemente el crecimiento de la actividad económica en la zona fue superior a lo estimado en dicho estudio. En otras palabras, si un inventario de emisiones posee una incertidumbre dada, los inventarios de emisiones proyectados poseen aún más incertidumbre.

11.3 Estimación de efectos en salud

En esta sección desarrollaremos estimaciones de efectos de salud asociados a la contaminación atmosférica en la zona urbana, específicamente la mortalidad prematura de corto y de largo plazo, explicando cómo se consigue la información base y cómo se obtienen los resultados. Nos focalizamos en la mortalidad prematura, ya que es el efecto que causa más daño social, pero la metodología (de corto plazo) es igualmente aplicable para otros efectos de morbilidad, distintos segmentos de la población, etcétera.

11.3.1 Información estadística

La información estadística corresponde a los informes anuales de estadísticas vitales producidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE),⁹³ y los Anuarios de Estadísticas Vitales del Ministerio de Salud,⁹⁴ donde aparecen las cifras de mortalidad por diferentes causas y por distintos segmentos de edad de la población, así como la población por tramo de edad a nivel comunal en todo el país. Las estimaciones se realizarán para el período 2009-2011, trienio para el cual se dispone de información completa.

11.3.2 Mortalidad prematura de corto plazo

Para la estimación de estos efectos usaremos el estudio desarrollado por Sanhueza, Vargas y Mellado⁹⁵ (2006), en el que se encontraron los siguientes riesgos relativos (RR) y sus respectivos intervalos de confianza:

TABLA 11.23
Riesgos relativos de mortalidad prematura en Temuco para $\Delta C=100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$

Grupo etario	Causa de mortalidad	RR (IC 95%)
Adultos ≥ 65 años	Enfermedades respiratoriasa	1,236 (1,004-1,522)
Adultos ≥ 65 años	Enfermedades circulatoriasb	1,176 (1,006-1,374)

a: incluyen todas aquellas codificadas en la letra J de la clasificación internacional ICD-10

b: incluyen todas aquellas codificadas en la letra J de la clasificación internacional ICD-10

La metodología para el cálculo se basa en la ecuación 2.3, que nos entrega la estimación del daño actual causado por la contaminación atmosférica:

$$\Delta Casos = [y(c_1)/y(c_0) - 1] \cdot y(c_0) \cdot Pob = y(Co) \cdot (RR - 1) \cdot (\Delta C/100) \cdot Pob$$

Ecuación 11.10

⁹³ Información disponible en: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/demografia_y_vitales/estadisticas_vitales/estadisticas_vitales.php

⁹⁴ Información disponible en: http://www.deis.cl/?page_id=757

⁹⁵ Fuente: P. Sanhueza, C. Vargas y P. Mellado (2006), Impacto de la contaminación del aire por PM10 sobre la mortalidad diaria en Temuco, Rev Med Chile 2006; 134: 754-761

Donde Pob es la población afectada (adultos mayores de 65 años en ese caso), ΔC es el exceso de MP_{10} (en $\mu g/m^3$) con respecto a una situación ideal de buena calidad del aire (la mejor que se podría conseguir en la zona) e $y(C_0)$ representa la tasa de efectos en salud en dichas condiciones de buena calidad del aire. Esta se puede calcular si aplicamos la ecuación 2.1 de la siguiente forma:

$$y(C_0) = y(C_1) \cdot \exp[\beta \cdot (C_0 - C_1)] \qquad \text{Ecuación 11.11}$$

Para estimar la concentración basal de MP_{10} en Temuco-Padre Las Casas, usamos un estudio⁹⁶ realizado en 1998 y donde se estimó (mediante metodología de modelo de receptor) que aproximadamente $15 \mu g/m^3$ del MP_{10} medido no provenían de la ciudad, sino de un nivel basal regional. Usaremos esta magnitud como concentración limpia para Temuco-Padre Las Casas para nuestros cálculos.

En primer lugar, a partir de las estadísticas de demografía y datos vitales se obtienen los siguientes resultados para las tasas de mortalidad de la población expuesta:

TABLA 11.24

Tasas de mortalidad no accidental en adultos mayores, Temuco-Padre Las Casas

Año	Población de adultos mayores	Tasa de mortalidad $y(C_1)^a$	
		Respiratoria	Circulatoria
2009	28.341	624	1.254
2010	29.407	631	1.413
2011	30.766	515	1.198

a: expresada por cada 100.000 habitantes

Luego, aplicamos la ecuación 2.4 para obtener el coeficiente β a partir del valor estimado de RR en cada caso de mortalidad (tabla anterior), y con este coeficiente calculamos las tasas de mortalidad en condiciones de aire limpio en la zona urbana, con lo cual se obtienen los siguientes resultados:

⁹⁶ Kavouras I.G., Koutrakis P., Cereceda-Balic F. y Oyola P, Source apportionment of PM10 and PM2.5 in five Chilean cities using factor analysis, J. Air Waste Man. Assoc., 51, 451-464, 2001.

TABLA 11.25

Tasas de mortalidad no accidental en adultos mayores, Temuco-Padre Las Casas

Año	Concentración anual de MP ₁₀ (µg/m ³) ^a	Tasa de mortalidad y(C ₀) ^b	
		Respiratoria	Circulatoria
2009	64,4	562	1.157
2010	62,4	571	1.309
2011	65,5	463	1.104

a: medido en el monitor de Las Encinas
b: expresada por cada 100.000 habitantes

Nótese que las tasas de mortalidad poseen una variación interanual y esto se va a propagar en las estimaciones que se hacen cada año. La siguiente tabla entrega un estimador central y su intervalo de confianza al 95% para la cantidad de casos de mortalidad prematura atribuibles a la contaminación atmosférica en la zona estudiada. El cálculo se hizo aplicando la ecuación 11.10 y los datos elaborados en esta sección.

TABLA 11.26

Estimación de mortalidad prematura (corto plazo) respiratoria y circulatoria

Año	Mortalidad respiratoria			Mortalidad circulatoria		
	Inferior	Central	Superior	Inferior	Central	Superior
2009	0	19	41	1	29	61
2010	0	19	42	1	32	68
2011	0	17	38	1	30	64

La estimación central de ambas causas de mortalidad entrega un valor de aproximadamente 50 casos anuales; si comparamos esta cifra con la mortalidad total de adultos mayores en esos mismos años (1.208, 1.340 y 1.279, respectivamente), entonces podemos concluir que en esos tres años aproximadamente 4% del total de muertes se podría atribuir a una muerte prematura asociada a la contaminación por MP₁₀ en la zona.

11.3.3 Mortalidad prematura de largo plazo

Aquí se aplicará la metodología de largo plazo descrita en el siguiente artículo:⁹⁷ “Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom Project”. En forma breve, la metodología utiliza el estimador de riesgo relativo calculado por Pope y otros,⁹⁸ expresado como coeficiente de impacto β . Luego, para la distribución de población por edades en la zona estudiada, se calcula el cambio en mortalidad por cada grupo de edad, con lo cual se calcula una nueva distribución de la población en el escenario modificado por el cambio de concentración analizado. De esta forma se calcula la cantidad de muertes prematuras evitadas y la ganancia en esperanza de vida de la población, para una reducción permanente y de largo plazo del $MP_{2.5}$ en la zona estudiada. La metodología ocupa tres años consecutivos de información del monitoreo ambiental y de las tablas de mortalidad anual por cada grupo de edad.⁹⁹

Después, para fines de comparación deduciremos el impacto de largo plazo de la contaminación por $MP_{2.5}$ en la zona, entre 2009 y 2011.¹⁰⁰ Para esto usaremos las planillas de Anuarios de estadísticas vitales del Ministerio de Salud y consideraremos las muertes totales no accidentales (es decir, excluyendo causas externas), por cada tramo de edad desde los 30 años en adelante. Los dos escenarios analizados corresponden a:

- a) Escenario 1, donde la concentración anual de $MP_{2.5}$ se reduce desde 46 a $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- b) Escenario 2, donde la concentración anual de $MP_{2.5}$ se reduce hasta $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

En ambos casos la reducción de concentración es permanente. La siguiente tabla resume los resultados para caso del escenario 1 y con la población de la zona correspondiente al promedio entre 2009 y 2011.

⁹⁷ M. Pascal y otros, *Science of the Total Environment* 449 (2013), 390-400.

⁹⁸ Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K et al. Lung cancer, cardiovascular mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287: 1132-1141.

⁹⁹ En: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713001320> se puede descargar la planilla de cálculo para hacer el análisis de largo plazo.

¹⁰⁰ La citada metodología europea requiere ingresar tres años consecutivos de datos.

TABLA 11.27
Efectos de largo plazo asociadas al escenario 1

Descripción	Inferior	Central	Superior
Esperanza de vida en 2011	50,0	50,0	50,0
Esperanza de vida con reducción de MP _{2,5}	50,4	51,2	52,2
Ganancia en esperanza de vida	0,4	1,2	2,2
Años de vida ganados	2.308	6.861	12.464
Número actual de muertes no accidentales	1.756	1.756	1.756
Muertes no accidentales con reducción de MP _{2,5}	1.687	1.562	1.425
Reducción en el número anual de muertes	68	193	331
Reducción en número de muertes/100.000 hab.	35	100	171

Luego se aprecia que en el caso de que la concentración de MP_{2,5} se redujera permanentemente a 26 µg/m³ como promedio anual, se produciría una ganancia en esperanza de vida promedio de la población de 1,2 años, con un total de 6.861 años de vida. Esta ganancia ocurriría en cada año y por supuesto se puede proyectar a futuro si se conocen las proyecciones de población en la zona. Además, se estima que se reducirían las muertes anuales en 193 casos, número superior al calculado en la sección anterior usando estudios locales de corto plazo. Esto nos muestra que es necesario realizar un análisis de largo plazo para capturar adecuadamente los beneficios de una mejoría de la calidad del aire en una zona que está muy contaminada por MP_{2,5}.

Para el caso del escenario 2, con cumplimiento de la recomendación de la OMS, los beneficios aumentan, como se aprecia en la siguiente tabla:

TABLA 11.28
fectos de largo plazo asociadas al escenario 2

Descripción	Inferior	Central	Superior
Esperanza de vida en 2011	50,0	50,0	50,0
Esperanza de vida con reducción de $MP_{2,5}$	50,7	52,2	54,1
Ganancia en esperanza de vida	0,7	2,2	4,0
Años de vida ganados	4.156	12.484	23.041
Número actual de muertes no accidentales	1.756	1.756	1.756
Muertes no accidentales con reducción de $MP_{2,5}$	1.635	1.424	1.207
Reducción en el número anual de muertes	120	331	548
Reducción en número de muertes/100.000 hab.	62	171	284

En este escenario la ganancia en esperanza de vida promedio de la población aumenta en 2,2 años, con un total (estimador central) de 12.484 años de vida ganados por la población. El estimador central de reducción de muertes es de 331, es decir, 19% del total de muertes no accidentales se puede atribuir a la mala calidad del aire actualmente existente en la zona.

11.4 Relación entre emisión y concentración

En la sección anterior hemos estimado cuáles serían los beneficios en salud de la población si se redujeran las concentraciones actuales de $MP_{2,5}$ en la zona urbana. En esta sección estimaremos cuáles deberían ser las reducciones en emisiones de $MP_{2,5}$ en la zona para que se alcancen esas concentraciones ambientales. Para estos fines vamos a usar el modelo de caja descrito en la sección 3.7, específicamente usando la ecuación 3.27, rescrita aquí de la siguiente forma:

$$q_i + h \cdot R_i = C_i \cdot \left\{ V_{d,i} + V_{w,i} + \left[\frac{Vh}{\Delta x} \right] \right\} - \left[\frac{Vh}{\Delta x} \right] C_i^0 \quad \text{Ecuación 11.12}$$

Para poder aplicar esta ecuación necesitamos la siguiente información:

- Características meteorológicas y geográficas de la zona
- Una estimación de la concentración de $MP_{2,5}$ fuera de la ciudad, C_0
- Un escenario futuro, con concentraciones conocidas de $MP_{2,5}$

Además, vamos a suponer que no hay generación relevante de material particulado secundario en la zona. Este es un supuesto simplificador, basado en las dimensiones de la zona urbana y la magnitud de las emisiones atmosféricas allí estimadas.

A partir de los resultados del análisis de la meteorología anual (sección 11.2) estimamos que el promedio anual de $V \cdot h$ es de $1.200 \text{ m}^2/\text{s}$. Asimismo, la precipitación anual es de 1.500 mm y el área de la zona urbana es de 58 km^2 , con un corte a lo largo de la dirección predominante del viento de $\Delta x = 10 \text{ km}$, por lo que el factor $[V \cdot h / \Delta x]$ toma el valor de $0,12 \text{ m/s}$.

Usando los resultados del estudio de Kavouras y otros,¹⁰¹ se estima que la concentración anual de $MP_{2,5}$ fuera de la ciudad es de $9 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, y se asume que este valor se sigue manteniendo en la actualidad. Por otra parte, de los datos del sistema SINCA se estima que el promedio anual de $MP_{2,5}$ entre 2009 y 2011 fue de $46 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ para toda la zona urbana.

Combinando estos resultados se puede estimar para el 2011 que las emisiones de $MP_{2,5}$ fueron de:

$$q_{MP_{2,5}} = 46 \cdot \left\{ 1 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \cdot 3,17 \times 10^{-11} \cdot 1.500 + 0,12 \right\} - 0,12 \cdot 9$$

$$q_{MP_{2,5}} = 5,61 - 1,08 = 4,53 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \rightarrow Q_{MP_{2,5}} = 8.285 \text{ ton/año} \quad \text{Ecuación 11.13}$$

Este valor posee alta incertidumbre debido a que se estimó usando un modelo aproximado para la relación entre emisión y concentración. Empleando el mismo procedimiento para estimar cuál debería ser la emisión de $MP_{2,5}$ para que la concentración anual se redujera a $26 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, obtenemos:

$$q_{MP_{2,5}} = 26 \cdot 0,122 - 0,12 \cdot 9 = 2,09 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \rightarrow Q_{MP_{2,5}} = 3.826 \text{ ton/año}$$

Esto implica reducir las emisiones de $MP_{2,5}$ en la zona en 54% con respecto al 2011. Si queremos cumplir con la norma anual chilena de $20 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, se obtiene que la emisión se debería reducirse a 30% del valor del 2011, es decir, unas 2.500 t/año .

¹⁰¹ Kavouras I.G., Koutrakis P., Cereceda-Balic F. y Oyola P., "Source apportionment of PM10 and PM2.5 in five Chilean cities using factor analysis", J. Air Waste Man. Assoc., 51, 451-464, 2001.

11.5 Factibilidad técnica de cumplir con la normativa ambiental del MP_{2,5}

A partir de los resultados anteriores, la pregunta que surge es si es posible reducir las emisiones en la zona en 70% de la línea base 2011. Para esto podemos considerar las siguientes emisiones típicas de los diversos equipos a leña actualmente existentes en la zona¹⁰² y su comparación con equipos de mejor tecnología:

Tipo de estufa	% humedad leña	Condición de operación	Factor de emisión, kg MP/kg leña
Cocina a leña		Típica	19
Estufa, tradicional	20	Típica	3,0-14,4
Estufa, tradicional	20	Mala	79
Estufa doble cámara	20	Típica	8,0
Estufa a pellets ¹⁰³		Típica	0,3-0,7

Luego, como medidas factibles de ser implementadas en la zona, podemos mencionar:

- i) Recambio de estufas tradicionales por equipos modernos de doble cámara, acompañado de la destrucción del equipo tradicional; esta medida ya ha comenzado a implementarse en la zona por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Para esto existe un procedimiento de inscripción de las viviendas que postulan a este subsidio.
- ii) Subsidios para el mejoramiento de la aislación térmica de las viviendas, el que se está planteando por parte de ese Ministerio para 40% de las viviendas más vulnerables de la zona.

Ambas medidas, consideradas en conjunto, producirían una gran reducción de emisiones de MP_{2,5} en la zona, la que se puede estimar en al menos 50% de las emisiones de la línea base 2009-2011, antes que comenzara a aplicarse la medida i); además, la medida ii) apunta a usar menos la cocina a leña como medio de

¹⁰² Nussbaumer, 2006. Results from Tests on Wood Stoves and revised Recommendations for Emission Limit Values for Chile. Report for Conama and Cosude. Zürich, 10. May 2006. Disponible en el expediente público de la norma.

¹⁰³ Preto, F. (2005). Emissions from residential wood combustion. IEA Task 32 Workshop, Recent developments on small scale combustion devices. París, Francia.

calefacción, ya que los aportes de las emisiones de $MP_{2.5}$ de estos equipos son muy relevantes¹⁰⁴ y no se debe dejarlos de lado. Luego, se puede concluir que es posible conseguir reducciones de emisiones comparables en magnitud con las requeridas para cumplir con la normativa nacional de calidad del aire anual.

Para el caso de cumplir con la normativa diaria del $MP_{2.5}$ en la zona, la autoridad dispone de medidas de contingencia (alerta, preemergencia y emergencia) ambiental que contribuirán a reducir las emisiones en el mediano plazo, ya que van a incentivar a que las viviendas de mayores recursos económicos implementen las medidas i) y ii) en forma voluntaria.

11.6 Evaluación económica de las medidas de abatimiento del $MP_{2.5}$

Si consideramos que se alcanzara el nivel de la normativa ambiental de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los beneficios en salud estarán dominados por la reducción en la mortalidad prematura, la que ascendería a un total de 246 muertes (estimador central), de las cuales 67 correspondería a adultos (30 a 64 años). Luego, para estimar los beneficios que tendría el cumplimiento de la norma, usaremos los siguientes valores obtenidos del estudio:¹⁰⁵ “Análisis general del impacto económico y social del plan de descontaminación atmosférica de Temuco y Padre Las Casas”, donde se estimó un VVE = USD 700.000, valor transferido de estudios internacionales y corregido por el ingreso en la zona. No queda claro en el citado estudio cuál fue el año base usado, así que supondremos que fue el 2000, con lo cual obtenemos que $VVE = 25.500 \text{ UF}$.

Por lo tanto, solamente considerando las muertes prematuras totales tenemos un beneficio de UF 6.2730.00 anual. Al igual que en el Ejemplo 10.1, usando una tasa de descuento de 6% anual y suponiendo que los beneficios ocurrirán de manera indefinida año tras año, el valor actual total de los beneficios por reducción de mortalidad asciende a UF 104.131.800.

En comparación, consideremos que el costo de mejorar la aislación térmica de una vivienda asciende a USD 5.000, es decir, UF 125; si el Estado subsidia completamente unas 5.000 viviendas en la zona, esto corresponde a UF 625.000, es decir, muy inferior al beneficio por reducción de mortalidad

¹⁰⁴ DICTUC S.A. Informe final: “Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en las comunas de Temuco y Padre Las Casas”, Febrero 2008, para Conama IX Región.

¹⁰⁵ Estudio realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) para la Conama IX Región, marzo de 2007.

prematura en solo un año de implementación de la medida. Por comparación, subsidiar la entrega de 50.000 estufas nuevas de doble cámara (cada una a UF 10) implicaría un costo de UF 500.000, comparable al costo de mejorar la aislación térmica de las viviendas.

En resumen, el costo de las medidas propuestas para ser implementadas en la zona urbana de Temuco-Padre Las Casas es muy inferior al beneficio que se obtendría debido a mejorar la calidad del aire, cumpliendo con la norma anual de $MP_{2.5}$ vigente en el país. Luego, se justifica que el Estado impulse esas medidas en la zona sur del país.

