



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental



**CARACTERIZACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES
EMISORAS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE
LA COMUNA DE SAN CARLOS Y PROPUESTA
PRELIMINAR DE MEDIDAS DE GESTIÓN DE LA
CALIDAD DEL AIRE**

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

NICOLÁS ANTONIO AVENDAÑO NEIRA

Profesores Guía
Dra. Claudia Ulloa Tesser
Dr. Jorge Jiménez del Río

CONCEPCIÓN, Chile
2019



“Caracterización de las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos de la comuna de San Carlos y propuesta preliminar de medidas de gestión de la calidad del aire”.

PROFESOR GUÍA: Dra. Claudia Ulloa Tesser
PROFESOR CO - GUÍA: Dr. Jorge Jiménez del Río
PROFESOR COMISIÓN: Dr. Octavio Rojas Vilches

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2019



Índice general

Resumen	1
1. Introducción.....	3
1.1. Objetivo General	5
1.2. Objetivos Específicos	5
2. Antecedentes	6
2.1. Contaminación atmosférica y efectos en la salud de las personas	6
2.2. Material particulado	8
2.3. Normas primarias de calidad del aire	9
2.4. Situación de la contaminación atmosférica en Chile	11
2.5. Área de estudio: Comuna de San Carlos	15
3. Metodología	19
3.1. Objetivo Específico 1: Realizar un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la comuna de San Carlos	19
a) Identificación de las diferentes fuentes de emisión	19
b) Clasificación de fuentes emisoras.....	20
c) Cálculo de emisiones	21
3.2. Objetivo Específico 2: Formulación de medidas preliminares de gestión de la calidad del aire, a partir del análisis del inventario realizado, focalizando las emisiones de material particulado	41
a) Análisis del inventario de emisiones	41
b) Propuesta de medidas de gestión	42
c) Comparación de las medidas propuestas.....	43
4. Resultados	53
4.1. Inventario de emisiones de la comuna de San Carlos	53
4.2. Propuesta preliminar de medidas de gestión de la calidad del aire en la comuna de San Carlos, focalizando las emisiones de MP2.5	56
1. EQUIPL.....	59
2. PELLET+.....	61
3. TERMOVIV	62
5. Conclusiones y recomendaciones.....	65

6. Bibliografía	67
-----------------------	----

Índice de tablas

Tabla 1: Efectos de los diferentes contaminantes atmosféricos en la salud de las personas.....	7
Tabla 2: Normas de calidad primaria para MP10 y MP2,5.....	10
Tabla 3: Factores de emisión industriales (kg/kg)	22
Tabla 4: FE para combustibles residenciales diferentes de la leña (ton/ton)	23
Tabla 5: FE por artefactos a leña seca (menos de 25% humedad)[g/kg].....	24
Tabla 6: FE por artefactos a leña húmeda (más de 25% humedad)[g/kg]	24
Tabla 7: Características de leña utilizada en las comunas de Chillán y Chillán Viejo...	26
Tabla 8: Factores de emisión ponderados para estimación de emisiones residenciales.	27
Tabla 9: Consumos anuales de los diferentes combustibles utilizados en la comuna de San Carlos.....	27
Tabla 10: Parque vehicular por categoría i, comuna de San Carlos año 2015.	29
Tabla 11: Composición vehicular tipo k, ciudad de Talca	30
Tabla 12: Valores kilómetros promedios y velocidades promedio para ciudades con tamaño de parque vehicular equivalente a 25.000 o menos.	31
Tabla 13: Superficies promedio anual de hectáreas consumidas por incendios forestales, comuna de San Carlos.	32
Tabla 14: Factores de emisión para la Biomasa arbórea aérea por tipo de vegetación (ton/ton).....	33
Tabla 15: Factores de emisión para Sotobosque por tipo de vegetación (ton/ton).....	34
Tabla 16: Factores de emisión para hojarasca por tipo de vegetación (ton/ton).....	34
Tabla 17: Factores de emisión para Necromasa por tipo de vegetación (ton/ton).....	35
Tabla 18: Factores de emisión para necromasa por tipo de vegetación (ton/ton).	36
Tabla 19: Factores de carga según tipo de vegetación y estructura de bosque (ton/ha).	36
Tabla 20: Factores de carga según tipo de vegetación (ton/ha).....	37
Tabla 21: Superficie anual consumida por quemas agrícolas, comuna de San Carlos.	38
Tabla 22: Factores de emisión según contaminante para cada especie de cultivo/plantación (ton/ton).....	39
Tabla 23: Factores de carga por cultivo/plantación.....	40
Tabla 24: Resumen de medidas propuestas para la reducción de emisiones de MP2,5 provenientes del sector residencial.	43
Tabla 25: Viviendas presentes en la zona urbana de San Carlos.	44
Tabla 26: Artefactos a leña existentes en la zona urbana.	44
Tabla 27: Factores de emisión de los equipos seleccionados para recambio.	45
Tabla 28: Emisión por hogar y total de los artefactos seleccionados.	46

Tabla 29: Niveles de eficiencia considerados para los diferentes equipos.	47
Tabla 30: Poder calorífico de combustibles considerados.	48
Tabla 31: Consumos de leña de calefactor certificado para reemplazo de artefactos seleccionados.	48
Tabla 32: FE de emisión para MP2,5 para equipos de reemplazo.	49
Tabla 33: Emisiones de MP2,5 por año-hogar en reemplazo de los artefactos seleccionados para las medidas de recambio.	49
Tabla 34: Costo total de inversión actualizado de medidas consideradas.	52
Tabla 35: Inventario de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos. ...	53
Tabla 36: Distribución porcentual de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos.	54
Tabla 37: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 1.	59
Tabla 38: Indicador preliminar de costo por tonelada para primera medida.	60
Tabla 39: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 2.	61
Tabla 40: Indicador preliminar de costo por tonelada para segunda medida.	62
Tabla 41: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 3.	62
Tabla 42: Indicador preliminar de costo por tonelada para tercera medida.	63

Índice de figuras

Figura 1: Impactos en la salud ante exposición a MP2,5.	9
Figura 2: Promedio anual de concentraciones de MP2,5 en Chile.	13
Figura 3: Distribución por tipo de fuente, año 2013, Chile.	14
Figura 4: Emisiones de MP2,5 por región y rubro, año 2013, Chile.	15
Figura 5: Atenciones de urgencia por causas del sistema respiratorio en niños menores de un año por semana estadística.	18
Figura 6: Atenciones de urgencia por causas del sistema respiratorio en adultos de 65 y más años por semana estadística.	18
Figura 7: Fuentes emisoras consideradas para la elaboración del inventario.	20
Figura 8: Proporción de artefactos utilizados para calefacción y cocina en la comuna de Chillán.	26
Figura 9: Esquema metodológico para la caracterización de polígonos censales por emisiones de MP2,5, San Carlos; Fuente: elaboración propia.	42
Figura 10: Distribución porcentual de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos.	55
Figura 11: Distribución porcentual de emisiones de MP2,5 en combustibles residenciales, comuna de San Carlos.	56
Figura 12: Densidad de emisiones de MP2,5 para el sector residencial, comuna de San Carlos.	57
Figura 13: Fotografía aérea de la zona urbana de San Carlos.	58
Figura 14: Contraste de indicador de \$MM/ton reducida de MP2,5.	64

Resumen

La contaminación atmosférica se define como la presencia de contaminantes del aire en niveles que puedan significar un riesgo para la salud del medioambiente y las personas. Anualmente, se estima que 2 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades asociadas a la contaminación del aire que respiran, mientras que otras, ven disminuida su calidad de vida a causa de los múltiples efectos negativos que produce en la salud humana. Dado lo anterior, esta se considera uno de los grandes problemas medioambientales a nivel mundial en la actualidad.

En Chile, miles son las personas que fallecen por las mismas razones, mientras que por otro lado se estima que al menos 10 millones de personas se encuentran expuestas a concentraciones superiores a la norma de calidad primaria de material particulado fino, el cual es considerado uno de los más peligrosos para la salud.

Ante la complejidad del escenario actual, el Ministerio del Medio Ambiente elaboró una estrategia de Planes de Descontaminación Atmosférica 2014-2018, con el objetivo de mejorar la calidad del aire en las principales ciudades del país, las cuales habitualmente suelen ser las más afectadas. Sin embargo, existen vacíos de información respecto a la calidad del aire a nivel nacional debido a la falta de estaciones de monitoreo en zonas pobladas que, al igual que aquellas principales ciudades del país, pueden presentar problemas de calidad del aire también por material particulado, exponiéndose a los riesgos para la salud que esto conlleva. Dentro de estas ciudades se encuentra San Carlos, en la región de Ñuble.

La ciudad de San Carlos no cuenta con datos de información relativa a la calidad del aire, por lo cual no es posible verificar legalmente si cumple con la norma de calidad primaria para material particulado fino. Aun así, debido a sus antecedentes es posible evidenciar que se trata de una comuna con problemas de calidad del aire.

Por ello, se elaboró un inventario de emisiones para la comuna, a fin de caracterizar las fuentes y emisiones de diferentes contaminantes, particularmente las de material particulado, y se realizó una propuesta preliminar de medidas de gestión de calidad del aire focalizada a los mayores aportantes de material particulado.

Los resultados arrojaron que las emisiones de material particulado grueso son equivalentes a 780,35 ton/año, mientras que las de material particulado fino fueron de 744,20 ton/año. De acuerdo con estos valores, el sector residencial fue la principal fuente de emisión de material particulado grueso (80,7%) y fino (82%).

En tanto, las medidas 1, 2 y 3 propuestas para la presente comuna presentaron una reducción de las emisiones de material particulado fino provenientes del sector residencial fueron equivalentes a 31,9%, 35,1% y 6,3% respectivamente. Los costos por tonelada reducida de material particulado fino asociados a cada una de las medidas fueron de 26 \$MM/ton, 52,13 \$MM/ton y 537,05 \$MM/ton respectivamente.

1. Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los mayores desafíos ambientales a nivel mundial en la actualidad, debido a los efectos altamente negativos que puede generar en la salud humana (*López-Aparicio et al., 2017*). Más de dos millones de muertes anuales a nivel mundial se pueden atribuir a los efectos de material particulado, donde las principales causas son por daño a los pulmones y al sistema respiratorio (*Shah et al., 2013; Chuang et al., 2011*). Este se clasifica según su diámetro aerodinámico de las partículas que lo componen, lo cual condiciona la intensidad de sus impactos (*MMA, 2016*). Así se conocen el MP10 (diámetro inferior o igual a 10 μm) y el MP2,5 (diámetro inferior o igual a 2,5 μm).

En Chile, se estima que las 3700 muertes prematuras anuales se deben a enfermedades cardiopulmonares asociadas a la exposición crónica de MP2,5 (*MMA, 2016*), siendo dicha cifra superior al doble de las muertes anuales por accidentes de tránsito (*CONASET, 2015*).

Para enfrentar los riesgos a la salud humana derivados de la contaminación del aire, el Ministerio del Medio Ambiente impulsó durante el año 2014 una nueva estrategia de Planes de Prevención y Descontaminación atmosférica para el período 2014-2018, como forma de mejorar la calidad del aire en las principales zonas urbanas del país. De este modo, fue posible impulsar alrededor de 14 nuevos Planes de Descontaminación en diferentes comunas pertenecientes a la zona centro-sur del país.

Si bien, la declaración de zonas saturadas y elaboración de numerosos planes de descontaminación a lo largo del país representan un avance importante en materias de gestión de la calidad del aire, actualmente sigue existiendo un vacío de información importante respecto de la contaminación atmosférica en muchas ciudades del centro-sur del país que no cuentan con estaciones de monitoreo.

Dentro de estas ciudades se encuentra la comuna de San Carlos, en la Región de Ñuble, en la cual de acuerdo a sus características (población, niveles de consumo de leña para calefacción residencial, entre otros) se presume que existen problemas de contaminación atmosférica por material particulado fino (MP2,5) y respirable (MP10).

En este trabajo se entregan los primeros antecedentes necesarios para analizar la problemática de la calidad del aire en la Comuna de San Carlos. En particular, se identifican y caracterizan las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, y se proponen medidas de gestión preliminares tendientes a su control.

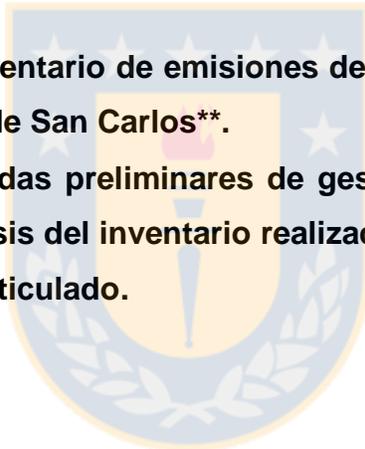


1.1. Objetivo General

Identificar y caracterizar las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos en la comuna de San Carlos.

1.2. Objetivos Específicos

- **Identificar las principales fuentes emisoras de contaminantes del aire.**
- **Realizar un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la comuna de San Carlos**.**
- **Formular medidas preliminares de gestión de la calidad del aire, a partir del análisis del inventario realizado, focalizando las emisiones de material particulado.**



2. Antecedentes

2.1. Contaminación atmosférica y efectos en la salud de las personas

La contaminación atmosférica se entiende como la presencia en la atmósfera de una o más sustancias que, en determinadas cantidades, impliquen molestias o riesgo para la salud de las personas y del medioambiente (*Martínez y Díaz de Mera, 2004*). Dichas sustancias son básicamente gases cuyo origen puede darse de forma natural (erupciones volcánicas, incendios) o antrópica, siendo ésta última la responsable de la mayor parte de la contaminación del aire en el mundo actual.

A grandes rasgos, las principales fuentes de origen antrópico corresponden a las emisiones de automóviles (fuentes móviles), las emisiones provenientes de las actividades derivadas de la industria (fuentes industriales) y aquellas originadas en los hogares por la combustión de biomasa para calefacción (fuentes residenciales) (OMS, s.f).

Para la OMS, aquellos contaminantes de mayor relevancia son llamados contaminantes atmosféricos clave, debido al riesgo sanitario que implican. Estos son el material particulado grueso y fino (MP10 y MP2,5 respectivamente), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el Ozono (O₃). Además, en Chile todos ellos son conocidos como contaminantes criterio, donde también se consideran el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄), los compuestos aromáticos volátiles (COV), los hidrocarburos totales (HCT) y el plomo (Pb).

En la tabla 1 se resumen los efectos en la salud de cada uno de estos contaminantes mencionados.

Tabla 1: Efectos de los diferentes contaminantes atmosféricos en la salud de las personas.

Contaminante atmosférico	Efectos en la salud humana
MP	Aumento de la morbilidad y la mortalidad en el corto y el largo plazo debido a problemas respiratorios o cardiovasculares.
SO₂	Irritación ocular, inflamación del sistema respiratorio, cardiopatía.
NO_x	Disminución del desarrollo de la función pulmonar, contribuye a enfermedades respiratorias en niños.
O₃	Problemas respiratorios, asma, reducción de la función pulmonar.
CO	Dolor de cabeza, mareo, sensación de desvanecimiento y cansancio.
CH₄	Asfixia.
COV	Irritación de vías respiratorias, irritación ocular, dolor de cabeza, mareos, trastorno visual, fatiga, pérdida de coordinación, reacciones alérgicas en la piel, náuseas y trastornos de memoria
HCT	Alteración del sistema nervioso, fatiga, dolor de cabeza, náuseas y adormecimiento.
Pb	Alteración del desarrollo del cerebro y del sistema nervioso en niños de corta edad, intoxicación, anemia, hipertensión, disfunción renal, inmunotoxicidad y toxicidad reproductiva.

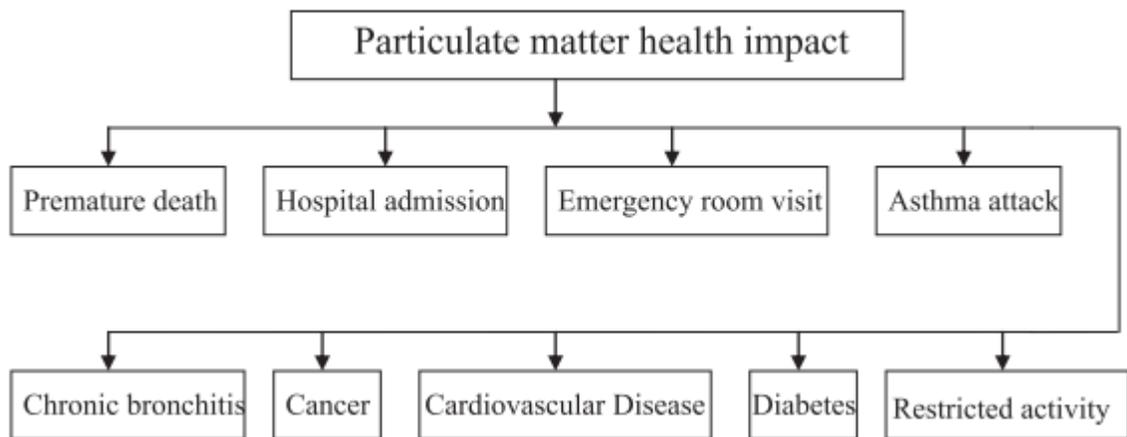
Fuente: Elaboración propia a partir de OMS, Murcia+Salud, SoCalGas, ATSDR y Consumer.

2.2. Material particulado

Dentro de los contaminantes atmosféricos, el material particulado (MP) es el que más se ha relacionado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población. Consiste en una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, las cuales varían en número, tamaño, forma, área de superficie, composición química, solubilidad y origen (*Pope y Dockery, 2006*). Dicha mezcla es tan diversa que es capaz de contener compuestos químicos (nitratos, sulfatos carbono elemental y orgánico), compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos) compuestos biológicos (endotoxinas y fragmentos de células) y metales (hierro, cobre, níquel, zinc y vanadio) (*WHO, 2013*).

El MP10 suele ser originado generalmente por procesos mecánicos, tales como las obras de construcción, resuspensión de polvo de los caminos y el viento, mientras que el MP2,5 proviene fundamentalmente de diferentes procesos de combustión. Ambos tipos de MP pueden encontrarse en zonas urbanas, pero la proporción entre ellos dependerá fuertemente de la geografía, la meteorología y las fuentes específicas de cada lugar (*OMS, 2006*).

La fracción de MP2,5 se caracteriza por el tamaño de sus componentes, cuyas partículas son capaces de atravesar las vías respiratorias hasta penetrar en pulmones y alvéolos (*CONAMA, 2010*)**. Esto provoca diferentes efectos en la salud de las personas, los cuales se resumen en la figura 1.



Fuente: A review on the human health impact of airborne particulate matter, 2015

Figura 1: Impactos en la salud ante exposición a MP2,5.

De estos efectos, los más estudiados y comprobados son los relacionados a enfermedades respiratorias y cáncer. Ambos son los responsables de la mayor parte de las muertes prematuras asociadas a la exposición crónica de MP2,5.

2.3. Normas primarias de calidad del aire

En Chile, las normas de calidad primaria para los 7 contaminantes conocidos como contaminantes criterio se definen de la siguiente manera:

Tabla 2: Normas de calidad primaria para MP10 y MP2,5

Contaminante	Valor de la norma	Unidad	Métrica	Excedencia
MP10	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Promedio aritmético anual	Promedio trianual
	150		Promedio aritmético diario	Percentil 98 de las concentraciones diarias
MP2,5	20	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Promedio aritmético anual	Promedio trianual
	50		Promedio aritmético diario	Percentil 98 de los promedios diarios
O3	120	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Promedio móvil de 8 horas	Promedio aritmético del percentil 99 de los máximos diarios de las medias móviles 8 hrs.
SO2	80	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Promedio aritmético anual	Promedio trianual
	250		Promedio aritmético diario	Promedio trianual del percentil 99 de los promedios diarios
NO2	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Media aritmética trianual	Promedio trianual
	400		Media aritmética horaria	Promedio trianual del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 1 hr.

CO	10.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Media aritmética de 8 horas	Promedio trianual
	30.000		Media aritmética de 1 hora	Percentil 98 de las concentraciones diarias
Pb	0,5	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	Media aritmética bianual	Promedio bianual

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2016.

La superación de los valores establecido por la norma en cualquiera de sus métricas implicará la declaración de zona saturada para la ciudad en cuestión, activando el procedimiento para la elaboración de un plan de descontaminación atmosférica (PDA). En tanto, si los valores de concentración de un contaminante se aproximan al menos en un 80% a los valores de la norma, esta se declarará zona de latencia, elaborándose un plan de prevención atmosférica (PPA).

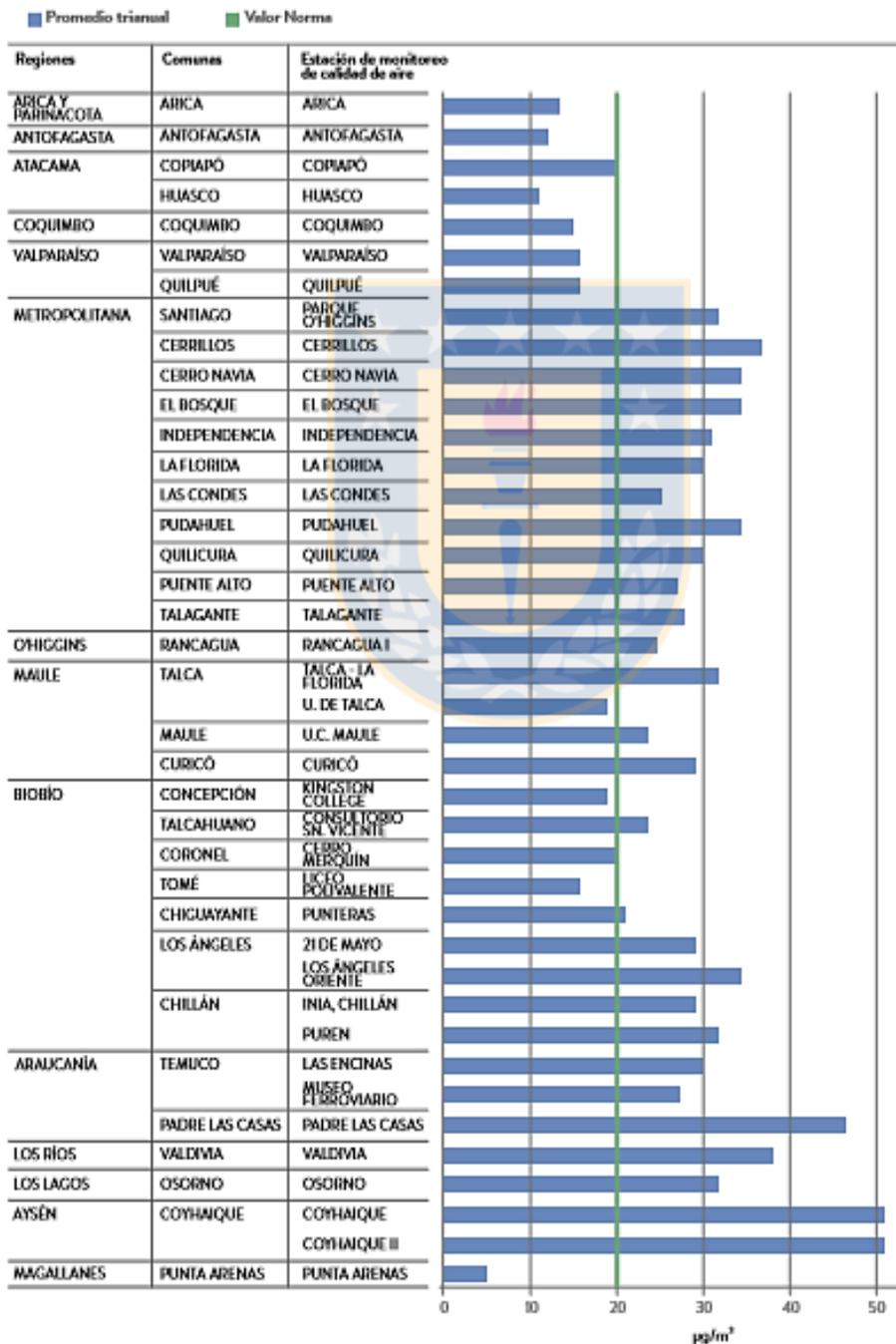
2.4. Situación de la contaminación atmosférica en Chile

Tal y como se mencionó anteriormente, en Chile se registran 3700 muertes prematuras al año debido a la contaminación del aire, donde todas se asocian a la exposición crónica de MP2,5 (MMA, 2016).

La figura 2 muestra los promedios anuales relativos a la concentración de MP2,5 asociados a diferentes regiones del país. A su vez, dichos promedios se contrastan con la norma de calidad primaria para MP2,5 en su métrica anual. En base a lo anterior, se observa que aquellas ciudades pertenecientes a la zona centro-sur del país se encuentran mayormente afectadas, exponiendo al

menos a 10 millones de personas a concentraciones anuales de MP2,5 que superan la norma de calidad primaria vigente.

PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE MP2,5 A NIVEL NACIONAL, PERIODO 2015.



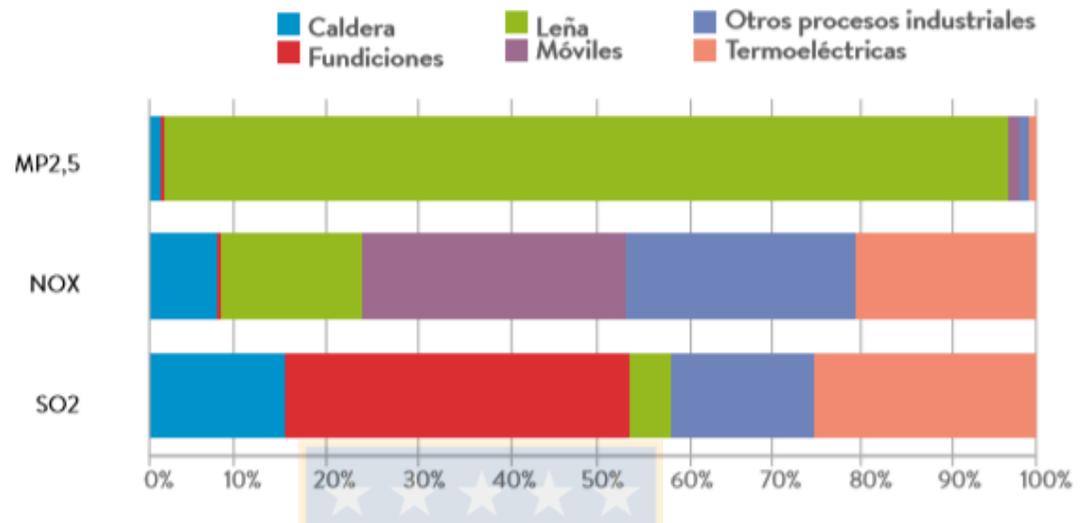
Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2016

Figura 2: Promedio anual de concentraciones de MP2,5 en Chile

Esta situación eventualmente se ha traducido en la elaboración de varios planes de descontaminación atmosférica por MP2,5 a lo largo del país (12 de los 23 existentes), generando investigaciones y estudios derivados que identifican aquellas fuentes principales de emisión, las cuales dependerán netamente de la realidad y las actividades propias de cada comuna. Ejemplos de dichos estudios son el Diagnóstico de la Calidad del Aire y Medidas de Descontaminación en las Comunas de Talca y Maule, Estudio de Propuesta de Medidas de Prevención y Reducción de emisiones de MP2,5 y MP10 para la zona latente y saturada de las comunas de Chillán y Chillán Viejo, el Estudio del uso cultural de leña como insumo principal de calefacción y cocción de alimentos en la comuna saturada de Coyhaique, Análisis energético de Viviendas para Ciudades del Centro y Sur de Chile y Sistematización en la información asociada a la leña, el informe técnico de antecedentes para declarar a las comunas de Temuco y Padre las Casas como zona saturada por MP2,5 y el Informe de Estado del Medio Ambiente del año 2016, entre muchos otros.

A nivel nacional, las fuentes más comunes de contaminación del aire son el sector industrial, el sector residencial y las fuentes móviles. De entre ellas, el sector residencial suele ser la fuente principal de MP2,5, debido a la combustión de leña para calefacción en los hogares (ver figura 1).

DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE FUENTE, AÑO 2013

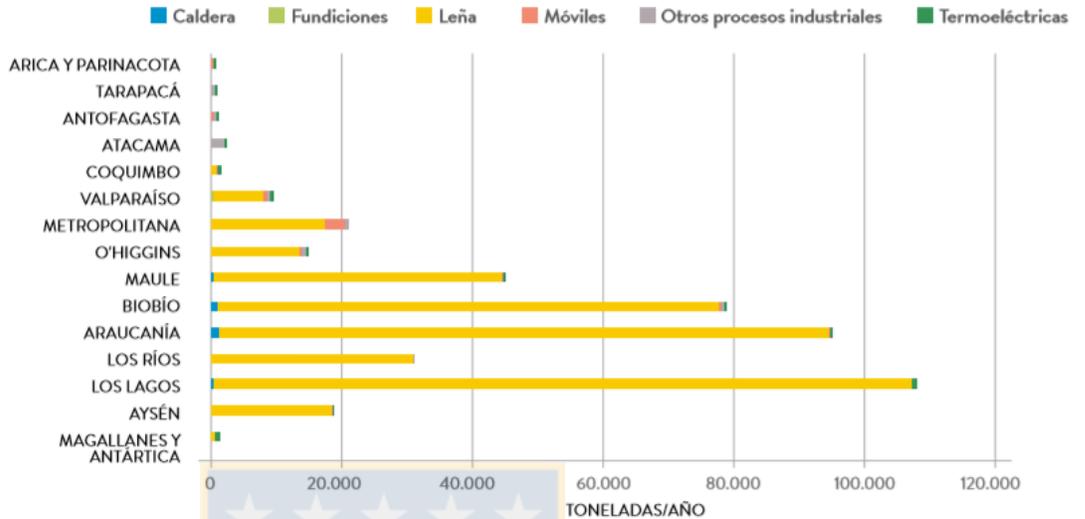


Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2016

Figura 3: Distribución por tipo de fuente, año 2013, Chile.

Esta práctica es particularmente frecuente en la zona centro-sur del país, en donde se generan la mayor cantidad de emisiones de MP2,5 a nivel nacional (ver figura 2). Dado lo anterior, no es sorpresa observar que, en aquellas regiones en donde las emisiones de MP2,5 por combustión residencial de leña son mayores, se encuentran comunas tales como por ejemplo Osorno, Temuco, Concepción, Chillán y Los Ángeles que actualmente han sido declaradas como zonas saturadas o latentes por dicho contaminante.

EMISIONES DE MP2,5 POR REGIÓN Y RUBRO, AÑO 2013



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2016.

Figura 4: Emisiones de MP2,5 por región y rubro, año 2013, Chile.

El hecho de no contar con información respecto de la calidad del aire en las comunas que se encuentran en las regiones más críticas, indica que aún hoy pueden existir comunas cuyos niveles de calidad del aire no han sido evaluados, como en el caso de San Carlos.

2.5. Área de estudio: Comuna de San Carlos

La comuna de San Carlos se ubica en la provincia de Punilla, 27 km al norte de la capital regional Chillán, en la Región de Ñuble. Posee una superficie total de 874 km², de la cual solo 17 km² corresponden a la zona urbana.

Esta comuna corresponde a la segunda más poblada luego de Chillán, con una población total de 53.024 habitantes, y cuenta con una densidad poblacional de

60,2 Hab/km², según el CENSO 2017. De éste total, el 62,7% de la población pertenece a la zona urbana, mientras que el 37,3% restante habita la zona rural.

San Carlos se encuentra inmersa en la cuenca hidrográfica del río Itata. En ella, se observa que el clima predominante corresponde al mediterráneo, el cual se caracteriza por contar con inviernos templados y lluviosos, veranos secos y calurosos y además con otoños y primaveras que varían tanto en temperatura como en precipitaciones. En el área de San Carlos se registra un promedio de lluvias equivalente a 1.346 mm, las cuales se concentran en un 79% entre los meses de otoño e invierno.

Las temperaturas registran un promedio anual de 15 °C. En el mes de enero se presenta un promedio de 23 °C, con temperaturas máximas de 34 °C a la sombra. Por otra parte, en julio las temperaturas mínimas caen por debajo de los 0 °C, y los promedios registrados no superan los 9 °C. En resumen, San Carlos posee una estación seca de 4 meses de duración, y cuenta además con un régimen de temperaturas que dan lugar a fenómenos de “heladas”, las cuales son negativas para los cultivos de la zona.

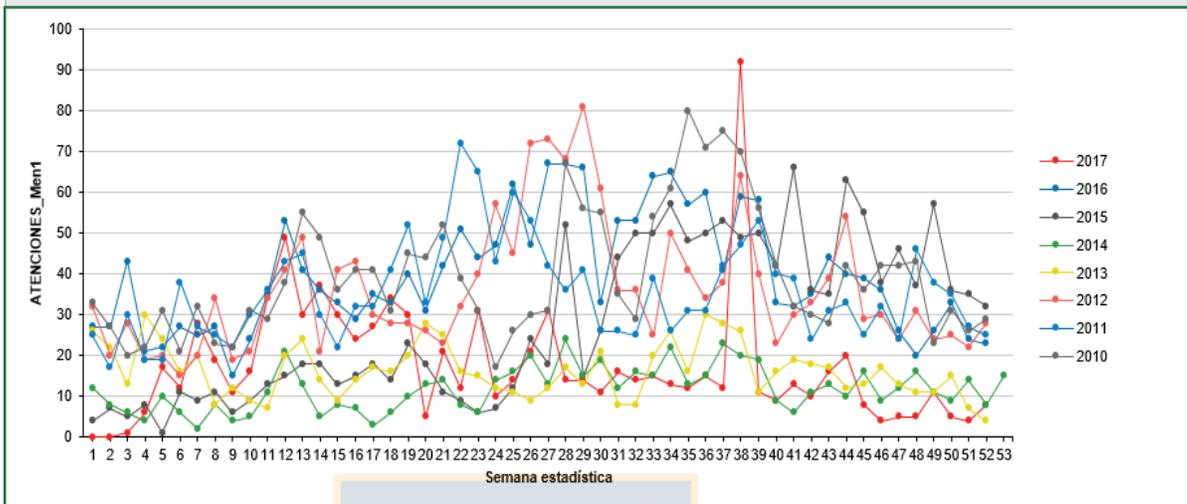
Su principal actividad económica corresponde a la agricultura, silvicultura y ganadería, siendo responsable de grandes producciones de frutas, verduras, cereales y carnes.

Actualmente San Carlos no cuenta con estaciones de monitoreo de la calidad del aire, por lo que es legalmente imposible conocer si efectivamente corresponde a una zona de latencia o saturación. Sin embargo, se cuenta con otros antecedentes que señalarían la presencia de problemas de calidad del aire, los cuales se presentan a continuación.

A través de la información proporcionada por la prensa, la población en San Carlos advierte una alta contaminación en el sector. Esto lo justifican debido a lo que ellos consideran un excesivo uso de leña en la comuna y a que el aire pasa a ser irrespirable en las épocas de temperaturas más bajas (otoño-invierno). Es posible observar que la misma población de San Carlos es quien percibe hechos que son propios de lugares con problemas de calidad del aire, especialmente cuando se trata de emisiones de MP2,5.

Además se cuenta con información del Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS), resumida en dos gráficos. En ambos gráficos se muestran las cantidades de atenciones por causas respiratorias por semana. El primero para niños menores de 1 año y el segundo para adultos mayores con 65 o más edad. Ambos grupos etarios son los más vulnerables a los riesgos que trae consigo la contaminación del aire, por lo cual, de existir problemas de calidad del aire en la zona, debería existir una correlación entre el aumento de ingresos a urgencias por esta causa y las épocas bajas temperaturas, que es donde se producen las condiciones suficientes que suelen dar origen a episodios de contaminación en zonas latentes y saturadas.

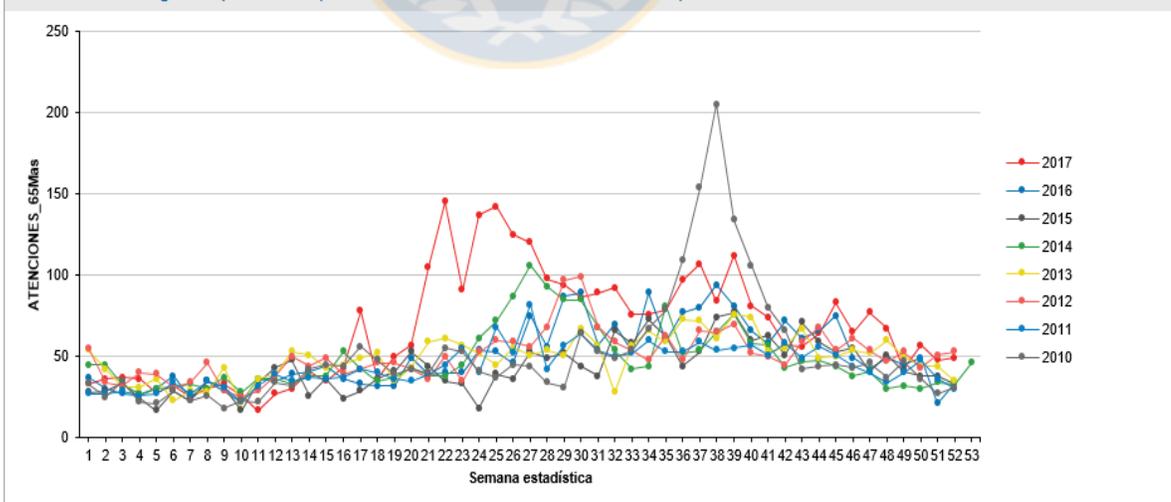
Atenciones de Urgencia por Causa y Semanas Estadísticas - Niños menores de 1 año - TOTAL CAUSAS SISTEMA RESPIRATORIO



Fuente: Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS)

Figura 5: Atenciones de urgencia por causas del sistema respiratorio en niños menores de un año por semana estadística.

Atenciones de Urgencia por Causa y Semanas Estadísticas - Adultos de 65 y más años - TOTAL CAUSAS SISTEMA RESPIRATORIO



Fuente: Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS)

Figura 6: Atenciones de urgencia por causas del sistema respiratorio en adultos de 65 y más años por semana estadística.

Observando estos gráficos, es posible verificar dicha correlación. Esto dado que el número de atenciones tiende a aumentar al aproximarse aquellas semanas de épocas frías, es decir, de otoño e invierno (semana 13 a semana 39). Esta tendencia se aprecia en la mayoría de los años y es mucho más clara en el caso de los niños menores de un año. Finalmente, todo indica que podríamos estar frente a una comuna con una exposición crónica de MP2,5.

3. Metodología

3.1. Objetivo Específico 1: Realizar un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la comuna de San Carlos.

Para realizar el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de la comuna de San Carlos se llevaron a cabo las siguientes actividades:

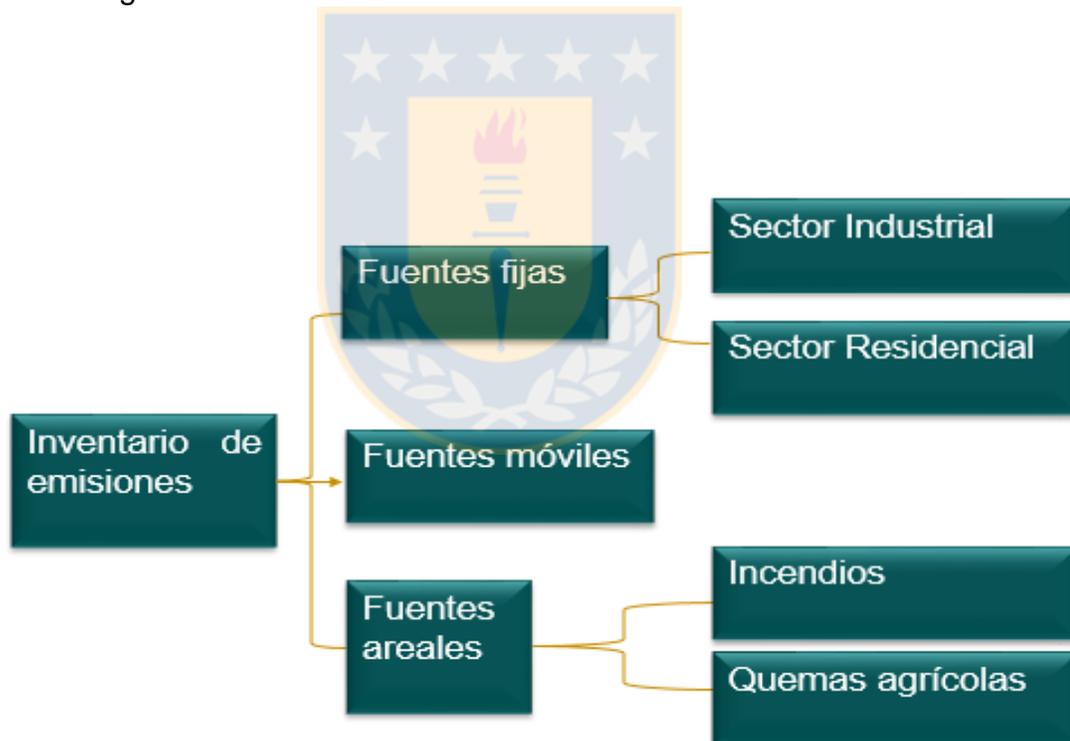
a) Identificación de las diferentes fuentes de emisión

Para identificar las principales fuentes de emisión se realizó una revisión de diferentes Planes de Descontaminación Atmosférica pertenecientes a diferentes ciudades del centro y sur del país, tales como Talca, Maule, Chillán y Osorno. Además se consultó la información presente en guías metodológicas para la estimación de emisiones del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) y el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Mediante la exploración de dicha información, fue posible conocer cuáles son las fuentes más importantes a considerar en un inventario de emisiones para una ciudad con las características de San Carlos.

b) Clasificación de fuentes emisoras

Posteriormente fue necesario clasificar las fuentes seleccionadas. Estas se dividieron en fuentes móviles, fijas y areales, siendo las dos últimas subdivididas en industria y residencia, y en quemas agrícolas e incendios forestales respectivamente (ver figura 7). Esto según el orden propuesto en las guías metodológicas consultadas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Fuentes emisoras consideradas para la elaboración del inventario.

c) Estimación de emisiones atmosféricas

A continuación, se presentará la metodología y los datos utilizados para el cálculo de emisiones de cada una de las fuentes seleccionadas.

Sector Industrial

La metodología de cálculo para estimar la emisión de contaminantes provenientes del sector industrial se basa en la siguiente ecuación:


$$E = A \times FE \left(\frac{1 - N}{100} \right)$$

Donde,

E= Emisión del contaminante en estudio (ton/año)

A= Tasa de actividad u operación (kg/año)

FE= Factor de emisión del contaminante en estudio (ton/kg)

N= Eficiencia de reducción del sistema de abatimiento o control

El factor A correspondió a valores extraídos de la base de datos de la declaración de emisiones del año 2014, según el DS 138. Se utilizó únicamente el año 2014 debido a que corresponde a información validada y usada para estudios del PER Biobío (Plan Energético Regional del Biobío).

Los factores de emisión fueron tomados de la guía metodológica del RETC y de estudios realizados por SICAM, quienes adaptaron los factores de emisión proporcionados por AP-42. Así, según la realidad industrial de la comuna, los factores de emisión industriales utilizados corresponden a los siguientes:

Tabla 3: Factores de emisión industriales (kg/kg)

Combustible	Tipo	MP10	MP2,5	NOx	SOx	COV	CO
Petróleo N°2 (Diésel)	Grupo electrógeno	0,00282	0,00068	0,0801	0,00425	0,00636	0,0173
Petróleo N°6	Grupo electrógeno	0,31	NR*	4,41	0,29	0,31	0,95

*NR: No reporta

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles del RETC y de SICAM.

Finalmente, la eficiencia de reducción del sistema de abatimiento fue buscada para cada proyecto particular en la base de datos del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en donde dichas especificaciones suelen encontrarse dentro de cada Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) perteneciente a cada proyecto. Para el caso de las empresas localizadas en la comuna de San Carlos, no se observó ningún sistema de abatimiento en operación, por lo cual N=-99.

Sector Residencial

Para estimar las emisiones de contaminantes a partir de fuentes residenciales se utilizó la siguiente metodología:

$$E_i = FE_{ij} \times C_j$$

Donde,

E_i = Emisión del contaminante en estudio (ton/año)

FE_{ij} = Factor de emisión del contaminante i en estudio para un artefacto de tipo j (ton/kg).

C_j = Consumo anual de combustible asociado al artefacto j (kg/año).

Los factores de emisión utilizados para el sector residencial, que fueron extraídos de estudios realizados por el DICTUC y por SICAM, se presentan a continuación.

Tabla 4: FE para combustibles residenciales diferentes de la leña (ton/ton)

Combustible	MP10	MP2,5	NOx	SOx	COV	CO
GLP	$1,54 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	$2,48 \times 10^{-3}$	$6,08 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$7,10 \times 10^{-4}$
Kerosene	0,018	0,018	0,60	$9,29 \times 10^{-4}$	0,048	0,12

Fuente: Elaboración propia a partir de estudio SICAM.

Tabla 5: FE por artefactos a leña seca (menos de 25% humedad)[g/kg]

Tipo de artefacto	MP10	MP2,5	NOx	SOx	COV	CO
Cocina a leña	7,5	7,0	2,1	0,2	114,5	305,4
Salamandra	12,7	11,8	7,7	0,2	114,5	309,9
Chimenea	10,1	9,2	1,3	0,2	114,5	126,3
Combustión lenta cámara simple	15,3	14,9	1,4	0,2	26,5	115,4
Combustión lenta doble cámara	8,3	8,1	1,4	0,2	26,5	115,4

Fuente: Elaboración propia a partir de estudios SICAM y DICTUC.

Tabla 6: FE por artefactos a leña húmeda (más de 25% humedad)[g/kg]

Tipo de artefacto	MP10	MP2,5	NOx	SOx	COV	CO
Cocina a leña	13,9	13,0	2,7	0,2	363,5	444,7
Salamandra	28,5	34,1	3,1	0,2	363,5	464,1
Chimenea	28,5	26,6	1,3	0,2	363,5	401,0
Combustión lenta cámara simple	72	69,9	1,4	0,2	239,1	1041,3
Combustión lenta doble cámara	39,3	38,2	1,4	0,2	239,1	1041,3

*Fuente: Elaboración propia a partir de estudios SICAM y
DICTUC.*

Para estimar finalmente la cantidad de emisiones provenientes de la combustión residencial de leña se utilizaron factores de emisión ponderados, los cuales dependen del tipo de artefacto, su distribución y el porcentaje del tipo de leña utilizada en la zona. Todo lo anterior se resume en la siguiente ecuación:

$$FE_p = \sum [Pe_0 \times (H1 \times FE + H2 \times FE)] \dots + [Pe_n \times (H1 \times FE + H2 \times FE)]$$

Donde,

FE_p: Factor de emisión ponderado para el contaminante en estudio (g/kg)

Pe: Porcentaje de utilización del equipo de calefacción (salamandra, chimenea, etc)

FE: Factor de emisión definido por humedad de leña y tipo de artefacto (g/kg)

H: Porcentaje de utilización de tipo de leña (1: seca o 2: húmeda)

Debido a la falta de información presente en la comuna de San Carlos, se utilizó la distribución de artefactos a leña y los porcentajes de tipo de leña (seca o húmeda) presentes en la comuna de Chillán, dada la cercanía entre ambas comunas y bajo el supuesto de que presentan una realidad socioeconómica similar.

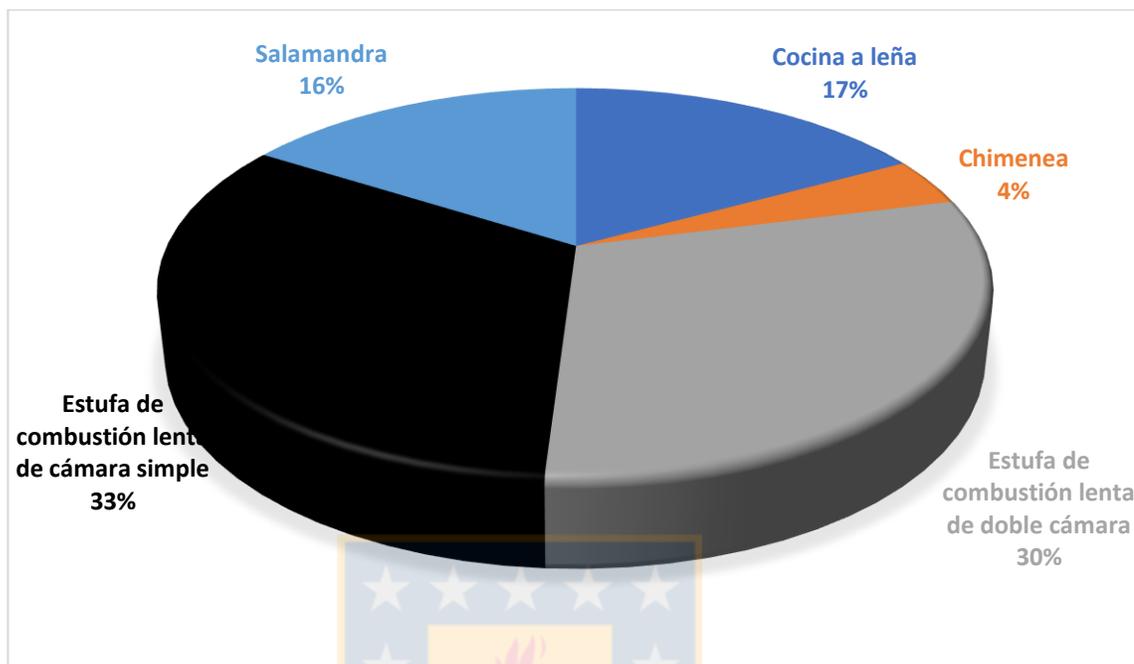


Figura 8: Proporción de artefactos utilizados para calefacción y cocina en la comuna de Chillán.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos utilizados en Estudio de Propuesta de Medidas de Prevención y Reducción de Emisiones de MP2,5 y MP10 Para la Zona Latente y Saturada de las Comunas de Chillán y Chillán Viejo.

Tabla 7: Características de leña utilizada en las comunas de Chillán y Chillán Viejo.

Tipo de leña	Uso (%)
Seca	95
Húmeda	5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos utilizados en Estudio de Propuesta de Medidas de Prevención y Reducción de Emisiones de MP2,5 y MP10 Para la Zona Latente y Saturada de las Comunas de Chillán y Chillán Viejo.

Con esta información, fue posible obtener los siguientes factores de emisión ponderados.

Tabla 8: Factores de emisión ponderados para estimación de emisiones residenciales.

Contaminantes	Factor de emisión ponderado (ton/ton)
MP10	0,01319
MP2,5	0,01274
NOx	0,00248
SOx	0,00020
COV	0,07262
CO	0,21782

Fuente: Elaboración propia a partir de estudios SICAM y DICTUC.

En tanto, los consumos anuales de los diferentes tipos de combustible fueron recopilados directamente desde el estudio de Costo-Beneficio de Implementar una Red de Gas Natural en Ciudades con Consumo Intensivo de Leña, el cual contenía los consumos anuales respectivos para leña, kerosene y GLP.

Tabla 9: Consumos anuales de los diferentes combustibles utilizados en la comuna de San Carlos.

Combustibles	Consumo anual (ton/año)
Kerosene	144,10
GLP	2.865,10
Leña	44.910,63

Fuente: Elaboración propia a partir de Costo-beneficio de implementar una red de gas natural en ciudades con consumo intensivo de leña, 2015.

Fuentes móviles

Para la estimación de fuentes móviles, la metodología para ciudades que no cuentan con modelo de transporte (como San Carlos) es la siguiente:

$$E_{cp} = \sum_i \sum_k FE(V_{ip})_{ck} \times PV_i \times C_{ik} \times KR_{ip}$$

Donde,

E_{cp} : Emisión total del contaminante “c” para una ciudad de tamaño de parque vehicular “p”.

$FE(V_{ip})_{ck}$: Corresponde al factor de emisión para un contaminante “c” asignado a un determinado tipo de vehículo “k” evaluada a una velocidad “v” promedio característico por tipo de vehículo “i” para una ciudad de parque vehicular “p”.

PV_i : Parque de vehículos tipo “i”.

C_{ik} : Composiciones vehiculares específicas de la ciudad en estudio para transformar vehículos de tipo “i” en vehículos de tipo “k”.

KR_{ip} : Kilómetros promedio recorridos por un tipo de vehículo “i” para una ciudad de tamaño de parque “p”.

Los factores de emisión fueron extraídos de la guía metodológica del RETC y del SINCA. Estos dependen del tipo de vehículo y de la velocidad promedio del mismo, por lo cual deben de ser calculados a partir de diferentes fórmulas generales. Estas se encuentran disponibles en los anexos de las guías anteriormente mencionadas.

El parque vehicular de San Carlos fue extraído de los datos proporcionados por el INE en su año más actual, el cual fue el del año 2015, por lo que se utilizó la información contenida en dicho año, las cuales fueron posteriormente agrupadas según la categoría i de vehículos.

Tabla 10: Parque vehicular por categoría i, comuna de San Carlos año 2015.

Categorías i	Cantidad
Particulares	5.910
Comerciales	4.378
Motos	859
Bus	169
Camión liviano-mediano	432
Camión pesado	42
Taxi-Taxi colectivo	266
TOTAL	12.056

Fuente: Elaboración propia a partir de INE 2015

Sin embargo, al no contar con un modelo de transporte, la comuna de San Carlos no presenta información acerca de la composición vehicular específica de categoría k, por lo cual se decidió utilizar la composición vehicular de la comuna de Talca, disponible en el informe Investigación de Instrumentos de Planificación Ambiental para Ciudades Intermedias (o PACIN II). Lo anterior debido a que Chillán tampoco cuenta con un modelo de transporte y asumiendo que Talca posee una distribución vehicular similar a la de San Carlos debido a la semejanza en sus características económicas (principalmente agricultura).

Tabla 11: Composición vehicular tipo k, ciudad de Talca

Tipo de vehículo k	Distribución (%)
Buses tipo I	2,2
Buses tipo II	0,2
Buses tipo III	0,6
Buses tipo IV	0,1
Camiones tipo I	4,4
Camiones tipo II	2,7
Camiones tipo III	1,1
Camiones tipo IV	0,1
Vehículos particulares CC	25,9
Vehículos particulares SC	22,3
Vehículos de alquiler CC	2,9
Vehículos de alquiler SC	1,9
Vehículos comerciales CC	13,8
Vehículos comerciales SC	14,3
Vehículos comerciales Diesel tipo I	5,9
Vehículos comerciales Diesel tipo II	0,2
Motos tipo I	0,8
Motos tipo II	0,7
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia a partir de Informe PACIN II

En tanto, los kilómetros promedios recorridos fueron extraídos de las mismas guías utilizadas hasta ahora, en donde se asignan según el tamaño del parque vehicular de la ciudad trabajada. Para este caso, se utilizaron aquellos datos

correspondientes a ciudades con tamaño de parque vehicular igual o menor a 25.000 vehículos.

Tabla 12: Valores kilómetros promedios y velocidades promedio para ciudades con tamaño de parque vehicular equivalente a 25.000 o menos.

Vehículos tipo i	Kilómetros/vehículo	Velocidad promedio
Particulares	5.592	35
Comerciales	7.990	36
Motos	1.796	35
Bus	30.212	20
Camión liviano-mediano	3.789	31
Camión pesado	24.445	35
Taxi-Taxi colectivo	31.677	27

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles del RETC, CONAMA.

Incendios forestales

Para estimar las emisiones provenientes de los incendios forestales, la metodología es la siguiente:

$$E_i = S \times FE_{ij} \times FC_j$$

Donde,

E_i : Emisiones del contaminante i en estudio (ton/año)

S : Superficie de hectáreas consumidas por incendios forestales (ha/año)

FE_{ij}: Factor de emisión del contaminante i considerado para la especie j (ton/ton)

FC_j: Factor de carga asociado a la especie j consumidas (ton/ha)

En primer lugar, los datos de hectáreas consumidas anualmente se recopilaron de la estadística histórica de CONAF, en donde se extrajo la superficie quemada de los últimos 10 años para obtener promedios anuales de superficie consumidas por incendios forestales en la comuna de San Carlos.

Tabla 13: Superficies promedio anual de hectáreas consumidas por incendios forestales, comuna de San Carlos.

Tipo de vegetación	Superficie promedio anual (ha/año)
Pino insigne 0-10 años	0,68
Pino insigne 11-17 años	26,25
Pino insigne 18 años o más	2,40
Eucalipto	7,02
Otras especies	0,07
Arbolado	0,61
Matorral	28,92
Pastizal	51,16
Agrícola	3,72
Desechos agrícolas	35,18
TOTAL	156,01

Fuente: Elaboración propia en base a CONAF, 2009-2018

Los factores de emisión utilizados para estimar los contaminantes liberados a partir de los incendios forestales fueron los propuestos por el SINCA en su guía metodológica. Estos se basan en que todo bosque (sea plantación o nativo) se compone de diferentes tipos de materia (Biomasa arbórea aérea, Biomasa

raíces, Sotobosque, Hojarasca y Necromasa) los cuales cuentan con diferentes factores de emisión y de carga (exceptuando matorral, pastizal y todos los desechos y superficies agrícolas), y que se asignan dependiendo de la vegetación y de la humedad. No se consideró la Biomasa de las raíces en los cálculos dado de que estas no se consumen durante los incendios debido a que habitan bajo tierra. Además, como la gran mayoría de los incendios tiene lugar en épocas cálidas como las de verano, se utilizaron los factores de emisión propios de una vegetación seca para cada especie. Al no contar con los rangos etarios de los eucaliptos, se optó por utilizar los factores de emisión pertenecientes al segundo rango etario (entre 11-17 años), asumiendo que a dicho rango pertenece la mayor parte de individuos de la especie. Mismo supuesto fue usado para la categoría “Otras especies”.

Tabla 14: Factores de emisión para la Biomasa arbórea aérea por tipo de vegetación (ton/ton).

Tipo de vegetación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Pino insigne 0-10 años	0,0053	0,0045	0,0037	0,0011	NR*	0,037
Pino insigne 11-17 años	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR*	0,079
Pino insigne 18 años o más	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR*	0,079
Eucalipto	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR*	0,079
Otras especies	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR*	0,079
Arbolado	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR*	0,079

Fuente: Elaboración propia a partir de SINCA 2011.

*NR: No reporta

Tabla 15: Factores de emisión para Sotobosque por tipo de vegetación (ton/ton).

Tipo de vegetación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Pino insigne 0-10 años	0,011	0,0097	0,0034	0,001	NR	0,11
Pino insigne 11-17 años	0,011	0,0097	0,0034	0,001	NR	0,11
Pino insigne 18 años o más	0,011	0,0097	0,0034	0,001	NR	0,11
Eucalipto	0,011	0,0097	0,0034	0,001	NR	0,11
Otras especies	0,011	0,0097	0,0034	0,001	NR	0,11
Arbolado	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079

Fuente: Elaboración propia a partir de SINCA 2011.

Tabla 16: Factores de emisión para hojarasca por tipo de vegetación (ton/ton).

Tipo de vegetación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Pino insigne 0-10 años	0,014	0,012	0,0032	0,0001	NR	0,14
Pino insigne 11-17 años	0,014	0,012	0,0032	0,0001	NR	0,14
Pino insigne 18 años o más	0,014	0,012	0,0032	0,0001	NR	0,14
Eucalipto	0,014	0,012	0,0032	0,0001	NR	0,14
Otras especies	0,014	0,012	0,0032	0,0001	NR	0,14
Arbolado	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079

Fuente: Elaboración propia a partir de SINCA 2011.

Tabla 17: Factores de emisión para Necromasa por tipo de vegetación (ton/ton)

Tipo de vegetación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Pino insigne 0-10 años	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079
Pino insigne 11-17 años	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079
Pino insigne 18 años o más	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079
Eucalipto	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079
Otras especies	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079
Arbolado	0,0087	0,0073	0,0035	0,0011	NR	0,079

Fuente: Elaboración propia a partir de SINCA 2011.

Para el caso de matorral, pastizal, agrícola y desechos agrícolas, se cuenta con un factor de emisión para cada uno, dado que corresponden a vegetación que no posee la misma configuración de un bosque. Los factores de emisión y de carga de especies Agrícolas fueron calculados a promediando los factores de emisión con las especies de cultivo más típicas de la zona (avena, cebada y trigo).

Tabla 18: Factores de emisión para necromasa por tipo de vegetación (ton/ton).

Tipo de vegetación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Matorral	0,0110	0,0097	0,0035	0,0011	NR	0,1100
Pastizal	0,0072	0,0069	0,0035	0,0011	NR	0,0520
Agrícola	0,0069	0,0066	0,0035	0,0011	NR	0,0670
Desechos agrícolas	0,0470	0,0400	0,0035	0,0011	NR	0,3700

Fuente: Elaboración propia a partir de SINCA 2011.

Finalmente, los factores de carga fueron obtenidos también de la guía del SINCA. Estos se encuentran asignados para cada especie

Tabla 19: Factores de carga según tipo de vegetación y estructura de bosque (ton/ha).

Tipo de vegetación	FC Biomasa arbórea aérea	FC Sotobosque	FC Hojarasca	FC Necromasa
Pino insigne 0-10 años	9,67	6,01	6,58	8,57
Pino insigne 11-17 años	65,23	7,75	3,85	4,63
Pino insigne 18 años o más	103,83	9,91	3,29	3,26
Eucalipto	54,14	11,27	10,27	11,85
Otras especies	29,84	9,51	7,06	4,12
Arbolado	240,40	4,20	22,53	44,20

Fuente: Elaboración propia a partir de, SINCA 2011.

Tabla 20: Factores de carga según tipo de vegetación (ton/ha).

Tipo de vegetación	FC (ton/ha)
Matorral	15,00
Pastizal	4,00
Agrícola	4,37
Desechos agrícolas	5,27

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas, SINCA 2011.

Quemas agrícolas

La metodología para el cálculo de emisiones por quemas agrícolas utiliza la misma ecuación para estimar emisiones por incendios forestales.

$$E_i = S \times FE_{ij} \times FC_j$$

Donde,

E_i: Emisiones del contaminante i en estudio (ton/año)

S: Superficie de hectáreas consumidas por quemas agrícolas (ha/año)

FE_{ij}: Factor de emisión del contaminante i considerado para la especie j(ton/ton)

FC_j: Factor de carga asociado a las especies j consumidas
(ton/ha)

La superficie consta, al igual que en la sección anterior, de los datos de hectáreas consumidas por quemas agrícolas proporcionados por CONAF. Se obtuvo un promedio anual de superficie en base a los últimos 5 años de información.

Tabla 21: Superficie anual consumida por quemas agrícolas, comuna de San Carlos.

Cultivo/plantación	S (ha/año)
Trigo	1158,86
Avena	95,76
Cebada	22,44
Maíz	199,04
Otros cultivos	58,55
Ramas	94,95
Vegetación	60,59
Pino	10,16
Eucalipto	109,35
Otra plantación	0,60

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas, SINCA 2011.

En relación a los factores de emisión utilizados, estos fueron los propuestos por la guía del SINCA, que a su vez los adaptó de CARB.

Tabla 22: Factores de emisión según contaminante para cada especie de cultivo/plantación (ton/ton).

Cultivo/plantación	FE MP10	FE MP2,5	FE NOx	FE SOx	FE COV	FE CO
Trigo	0,004800	0,004800	0,002000	0,004100	0,003400	0,056000
Avena	0,009400	0,008700	0,002000	0,000270	0,004700	0,062000
Cebada	0,006500	0,006300	0,002300	0,000045	0,006800	0,083000
Maíz	0,005200	0,004900	0,001500	0,000180	0,003000	0,032000
Otros cultivos	0,026000	0,025000	0,007800	0,000910	0,018000	0,058000
Ramas	0,037000	0,032000	0,032000	0,011000	0,001100	0,210000
Vegetación	0,007200	0,006900	0,002000	0,000280	0,021000	0,052000
Pino	0,056000	0,048000	0,030000	0,032000	0,210000	0,450000
Eucalipto	0,056000	0,048000	0,030000	0,032000	0,210000	0,450000
Otra plantación	0,028000	0,024000	0,015000	0,016000	0,110000	0,210000

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas, SINCA 2011.

De la misma forma, los factores de carga fueron obtenidos del SINCA, quien adaptó la información tomada desde la CARB.

Tabla 23: Factores de carga por cultivo/plantación.

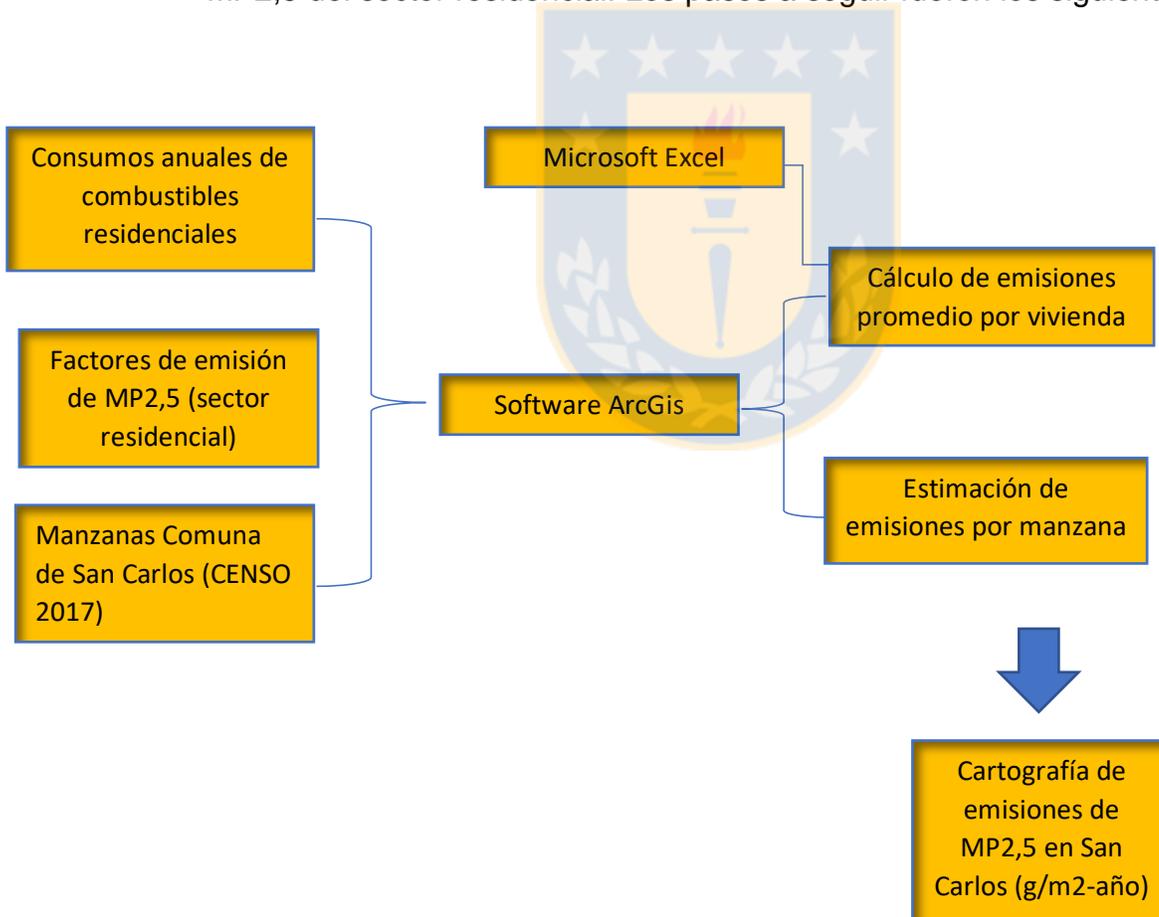
Cultivo/plantación	FC (ton/ha)
Trigo	4,7
Avena	4,0
Cebada	4,2
Maíz	10,4
Otros cultivos	4,8
Ramas	1,2
Vegetación	4,0
Pino	6,5
Eucalipto	5,4
Otra plantación	3,9

Fuente: Elaboración propia a partir de Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas, SINCA 2011.

3.2. Objetivo Específico 2: Formulación de medidas preliminares de gestión de la calidad del aire, a partir del análisis del inventario realizado, focalizando las emisiones de material particulado

a) Análisis del inventario de emisiones

Al analizar el inventario, fue posible identificar aquellas fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos más importantes dentro de San Carlos. A partir de esto, se determinaron las zonas espaciales de mayor emisión dentro de la ciudad de San Carlos. En esta oportunidad, esto se realizó a partir de las emisiones de MP_{2,5} del sector residencial. Los pasos a seguir fueron los siguientes:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Esquema metodológico para la caracterización de polígonos censales por emisiones de MP2,5, San Carlos; Fuente: elaboración propia.

Una vez generada la cartografía, esta se identificaron los sectores donde se genera la mayor cantidad de emisiones por año en la zona urbana de San Carlos, a fin de poder orientar las medidas formuladas

b) Propuesta de medidas de gestión

Posteriormente, a partir de la revisión del informe del “Estudio de propuesta de medidas de prevención y reducción de emisiones de MP2,5 y MP10 para la zona latente y saturada de las comunas de Chillán y Chillán Viejo” el cual contiene una investigación general de diferentes medidas aplicadas tanto internacional como nacionalmente, se seleccionaron aquellas que fuesen factibles de implementar y que tuviesen una mayor reducción sobre las emisiones del sector residencial, el cual fue identificado como la fuente principal de contaminación del aire en San Carlos.

Tabla 24: Resumen de medidas propuestas para la reducción de emisiones de MP2,5 provenientes del sector residencial.

Número	Descripción
1	Recambio de calefactores a leña antiguos por nuevos equipos que cumplan la norma de emisión (DS N°39/2011) a través de programas financiados por el estado.
2	Recambio de calefactores a leña antiguos por nuevos equipos que funcionen a pellets, a través de programas financiados por el estado.
3	Mejoramiento térmico de viviendas existentes mediante el Programa de Protección del Patrimonio Familiar (PPPF).

Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto de Investigaciones Tecnológicas UdeC 2013.

c) Comparación de las medidas propuestas

Debido a que dos de las tres medidas propuestas incluyen recambio de artefactos, en primer lugar, fue necesario realizar un análisis del parque de artefactos a leña en la zona urbana de San Carlos, a fin de seleccionar aquellos equipos más contaminantes para ser reemplazados.

Para ello, se procedió a estimar la cantidad de hogares que utilizan leña para calefacción. Esto se hizo multiplicando el número de viviendas en la zona urbana según el CENSO 2017 y los datos de penetración de leña de la encuesta CASEN 2002 proyectada al 2015.

Tabla 25: Viviendas presentes en la zona urbana de San Carlos.

Viviendas	Penetración de leña para calefacción	Viviendas con consumo de leña
12.773	68,1%	8698

Fuente: Elaboración propia a partir del CENSO 2017 y CASEN 2002 proyectada a 2015

Tabla 26: Artefactos a leña existentes en la zona urbana.

Artefactos existentes	Utilización (%)	Cantidad
Salamandra	16	1392
Estufa de combustión lenta de cámara simple	33	2870
Estufa de combustión lenta de cámara doble	30	2610
Cocina a leña	17	1478
Chimenea	4	348
TOTAL	100	8698

Fuente: Elaboración propia

Debido a su mayor presencia en el parque de artefactos que utilizan leña, las estufas de combustión lenta de cámara doble, simple y las salamandras son aquellos equipos que contribuyen mayormente a las emisiones de MP2,5 presentes en el área de estudio, por lo cual se consideraron como equipos aptos para realizar los recambios propuestos en las medidas 1 y 2. Se excluyen las

cocinas a leña debido a que no constituyen artefactos exclusivos para calefacción residencial.

Además de la selección anterior, fue necesario corregir los factores de emisión para MP2,5 de las estufas de combustión lenta de cámara doble, simple y salamandras. Esto según el tipo de leña utilizado en San Carlos (suponiendo el mismo escenario utilizado en los estudios de Chillán y Chillán Viejo).

Tabla 27: Factores de emisión de los equipos seleccionados para recambio.

Artefactos existentes	FE MP2,5 leña seca (g/kg)	FE MP2,5 leña húmeda (g/kg)	Tipo de leña utilizada (%)		FE MP2,5 corregido (g/kg)
			Seca	Húmeda	
Salamandra	11,8	34,1			12,92
Estufa de combustión lenta de cámara simple	14,9	69,9	95	5	17,65
Estufa de combustión lenta de cámara doble	8,1	38,2			9,61

Fuente: Elaboración propia

Con los factores de emisión corregidos y la metodología de cálculo presentada para el sector residencial, fue posible determinar las emisiones por hogar y totales de MP2,5 provenientes de los artefactos seleccionados.

Tabla 28: Emisión por hogar y total de los artefactos seleccionados.

Artefactos existentes	Emisión MP2,5 (kg/año-hogar)	N° artefactos en zona urbana	Emisión total de MP2,5 (ton/año)
Salamandra	35,14	1392	48,91
Estufa de combustión lenta de cámara simple	48,01	2870	137,79
Estufa de combustión lenta de cámara doble	26,14	2610	68,23
TOTAL	-	6872	254,93

Fuente: Elaboración propia

Medidas 1 y 2

Para estimar los potenciales de reducción de las medidas 1 y 2, fue necesario estimar los nuevos consumos anuales de combustible por hogar necesarios para reemplazar cada uno de los artefactos seleccionados. Lo anterior se realizó según la siguiente ecuación

$$C_b = \frac{C \times E_a \times P_a}{E_b \times P_b}$$

Donde,

C_b : Consumo de combustible del artefacto de reemplazo (kg/año-hogar).

C : Consumo promedio de leña por hogar (kg/año-hogar).

E : Eficiencia del artefacto de reemplazo, b, o del artefacto a reemplazar, a (%).

P : Poder calorífico del combustible del artefacto de reemplazo, b, o del artefacto a reemplazar, a (kcal/kg).

El consumo promedio de leña por hogar fue extraído del anexo de combustibles proveniente del estudio de la red de gas para ciudades con uso intensivo de leña. En él se indica que para San Carlos el consumo promedio corresponde a 2.720 kg/año-hogar.

Las eficiencias de los diferentes artefactos y el poder calorífico de los combustibles considerados fueron encontradas mediante revisión bibliográfica de cada equipo y combustible en cuestión. El resumen de dichos datos se presenta a continuación.

Tabla 29: Niveles de eficiencia considerados para los diferentes equipos.

Artefactos considerados	Eficiencia (%)
Calefactor certificado	75
Estufa a pellet	90
Estufa de combustión lenta de cámara simple	60
Estufa de combustión lenta de cámara doble	60
Salamandra	35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30: Poder calorífico de combustibles considerados.

Combustibles considerados	Poder calorífico (kcal/kg)
Leña	3.500
Pellet	4.200

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta información, se obtuvieron los consumos de combustible necesarios para las diferentes medidas de recambio de equipos, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 31: Consumos de leña de calefactor certificado para reemplazo de artefactos seleccionados.

Artefacto de reemplazo	Consumo estufa cámara doble (kg/año-hogar)	Consumo estufa cámara simple (kg/año-hogar)	Consumo salamandra (kg/año-hogar)
Calefactor certificado DS N°39/2011	2.176	2.176	1.269
Estufa a pellet	1.511	1.511	881

Fuente: Elaboración propia

Luego, hizo falta corregir los factores de emisión de los artefactos de reemplazo, obtenidos en informes elaborados por SICAM Ingeniería, según el tipo de leña utilizada.

Tabla 32: FE de emisión para MP2,5 para equipos de reemplazo.

Artefactos a cambiar	FE MP2,5 (g/kg leña seca)	FE MP2,5 (g/kg leña húmeda)	Tipo de leña utilizada (%)		FE MP2,5 corregido (g/kg)
			Seca	Húmeda	
Calefactor certificado	2,3	10,2	95	5	2,7
Estufa a pellet	1,8	-			1,8

Fuente: Elaboración propia a partir de estudios SICAM 2013

Así, con la información de los consumos que tendrían los artefactos de reemplazo más sus respectivos factores de emisión corregidos para MP2,5, se determinaron las emisiones por hogar para este contaminante.

Tabla 33: Emisiones de MP2,5 por año-hogar en reemplazo de los artefactos seleccionados para las medidas de recambio.

Artefacto de reemplazo	Emisión MP2,5 en reemplazo de estufa de cámara doble (kg/año-hogar)	Emisión MP2,5 en reemplazo de estufa de cámara simple (kg/año-hogar)	Emisión MP2,5 en reemplazo de salamandra (kg/año-hogar)
Calefactor certificado DS N°39/2011	5,88	5,88	3,43
Estufa a pellet	2,72	2,72	1,59

Fuente: Elaboración propia

Así el potencial de reducción de emisiones se calculó mediante la diferencia de emisiones en ton/año-hogar entre los artefactos a reemplazar y los artefactos de reemplazo. Para obtener el potencial de reducción de emisiones total de las medidas 1 y 2 se multiplicó cada diferencia de emisiones por hogar por su respectiva cantidad de equipos a reemplazar presentes en la zona urbana. A partir de los valores obtenidos se determinó el porcentaje de reducción de MP2,5 de ambas medidas respecto del total de emisiones de MP2,5 obtenido del inventario.

Medida 3

En la tercera medida propuesta, fue necesario calcular el potencial de reducción de emisiones a partir del mejoramiento térmico de viviendas existentes que tuviesen problemas de eficiencia o que contarán con equipos más ineficientes y/o contaminantes. La metodología de cálculo del potencial de reducción de emisiones, para este caso, fue la siguiente:

$$\Delta E_{AISLACIÓN} = \sum_i H_i^{subsidio} \times C \times fe_j \times R$$

Donde,

$H_i^{subsidio}$: Hogar i con subsidio de aislación térmica (1 tiene subsidio y 0 no tiene subsidio).

C: Consumo promedio de leña por hogar (kg/año).

fe_j : Factor de emisión de equipo tipo j existente en el hogar.

R: Reducción porcentual de consumo de leña gracias a mejor aislamiento

Bajo el supuesto de que aquellos hogares seleccionados para el recambio corresponden también a viviendas con problemas de aislación, se consideró la misma cantidad de estas para estimar el potencial de reducción de emisiones. El consumo promedio de leña por hogar sigue siendo el mismo dato usado en cálculos anteriores: 2.720 kg/año.

Los factores de emisión utilizados correspondieron a los factores de emisión de MP2,5 corregidos de los equipos seleccionados en las medidas de recambio (estufa de combustión lenta de cámara doble y simple y salamandra).

A partir de diferentes antecedentes (PPPF), se conoce que esta medida (por si sola) es capaz de reducir el consumo de leña en un 35%. Sin embargo, debido a la poca conciencia respecto de la eficiencia energética de parte de la población, se suele utilizar energía más de la necesaria, lo cual radica en niveles de consumo excesivos de combustible, en este caso, leña. Dado lo anterior, se decidió utilizar una reducción equivalente a un 15%.

Medidas 1, 2 y 3

Por último, se optó por comparar un indicador de \$/ton reducida de MP2,5 entre las medidas formuladas, a fin de contar con una primera aproximación respecto de cuáles podrían ser más atractivas en términos de económicos.

Este indicador se basó en la ecuación utilizada para calcular costo-efectividad, con la salvedad que, en lugar de utilizar el costo total, se usó el costo total de inversión de cada una de las medidas formuladas.

Para las dos primeras medidas formuladas, se contaba únicamente con el costo total de inversión en moneda del año 2014, por lo cual fue necesario actualizar estos valores mediante la variación del IPC entre 2014 y 2019, la cual corresponde a un 15,4%, según la relación presentada a continuación.

$$\text{Valor reajustado} = \frac{(\text{Valor a reajustar} \times \text{variación IPC})}{100} + \text{Valor a reajustar}$$

De este modo, se obtuvo el reajuste del costo total de inversión extraído del estudio Diagnóstico de la Calidad del Aire y Medidas de Descontaminación en las Comunas de Talca y Maule.

Tabla 34: Costo total de inversión actualizado de medidas consideradas.

Medida	Costo total de inversión por equipo (CLP 2014)	Variación IPC entre 2014 y 2019 (%)	Costo total de inversión por equipo actualizado (\$)
EQUIPL	640.000	15,4	738.560
PELLET+	1.410.000		1.627.140

Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto de Investigaciones Tecnológicas UdeC 2013

En tanto, el costo de inversión total para la medida 3 se estimó en un valor promedio de \$3 millones, el cual no varía debido a que son valores contabilizados en UF por el PPPF.

Luego, con el costo total de inversión reajustado y el potencial de reducción de cada medida, fue posible obtener el indicador (\$/ton reducida de MP2,5) según la siguiente ecuación.

$$\text{Indicador} \left(\frac{\$}{\text{ton reducida}} \right) = \frac{\text{Costo total de inversión} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right)}{\text{Potencial de reducción} \left(\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right)}$$

Finalmente se realiza la comparación según los indicadores obtenidos.

4. Resultados

4.1. Inventario de emisiones de la comuna de San Carlos

A continuación, se presenta el inventario de emisiones calculado para la comuna de San Carlos, año base 2017.

Tabla 35: Inventario de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos.

Fuentes		Contaminantes (ton/año)					
		MP ₁₀	MP _{2,5}	NO _x	SO _x	COV	CO
Fijas	Industrial	1,06	0,23	28,37	1,53	2,24	6,13
	Residencial	629,51	609,21	1.831,31	12,52	3.297,60	9.837,52
Móviles		13,63	12,54	277,18	7,36	NR*	782,43
Aerales	Incendios	44,97	38,33	17,83	8,80	NR*	404,94
	Quemas agrícolas	91,18	83,89	41,14	45,35	176,08	749,26
Total		780,35	744,20	2.195,83	75,56	3.475,92	11.780,28

NR*: No reporta

Fuente: Elaboración propia

La proporción entre MP10 y MP2,5 indica que 96,8% del material particulado grueso se compone de material particulado fino. Esto evidencia que las emisiones de material particulado en San Carlos tienen su origen

fundamentalmente a partir de procesos de combustión de combustibles residenciales. Dado lo anterior, el sector residencial es la fuente que emite mayor cantidad de MP2,5.

Tabla 36: Distribución porcentual de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos.

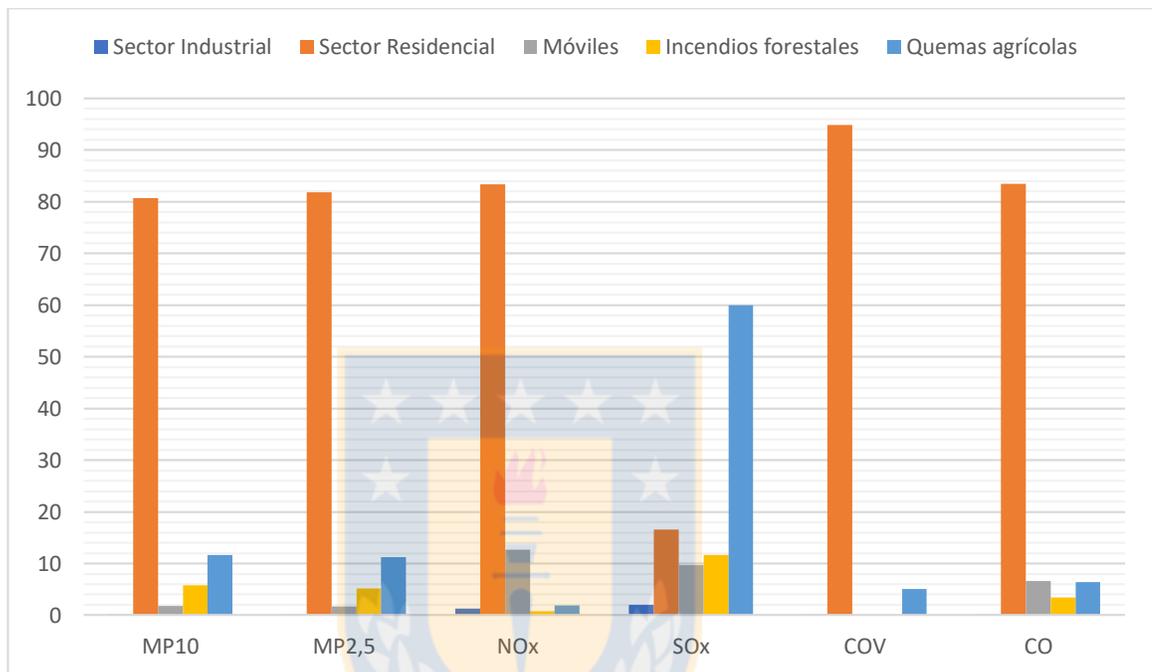
Fuentes		Contaminantes (%)					
		MP ₁₀	MP _{2,5}	NO _x	SO _x	COV	CO
Fijas	Industrial	0,14	0,031	1,29	2,02	0,064	0,052
	Residencial	80,67	81,86	83,40	16,57	94,87	83,51
Móviles		1,75	1,69	12,62	9,74	NR*	6,64
Aerales	Incendios	5,76	5,15	0,81	11,65	NR*	3,44
	Quemas agrícolas	11,68	11,27	1,87	60,02	5,07	6,36
Total		100	100	100	100	100	100

NR*: No reporta

Fuente: Elaboración propia

La mayor cantidad de MP2,5 proviene del sector residencial (81,86%), seguido de las quemas agrícolas (11,27%) y de los incendios forestales (5,15%), pero en una medida muy inferior en comparación. La incidencia por parte de las fuentes areales es mayor que la de otras fuentes tales como las móviles o las industriales, debido a que San Carlos corresponde a una comuna principalmente agrícola. Además cuenta con un pequeño parque vehicular (menos de 25.000 vehículos)

y un bajo número de industrias cuyas emisiones corresponden netamente al uso de diésel asociado a grupos electrógenos, por lo que sus emisiones, tanto de fuentes móviles como industriales, no logran ser significativas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10: Distribución porcentual de emisiones atmosféricas estimadas, comuna de San Carlos

Como se observa, las fuentes que generan mayores aportes de contaminantes corresponden a las fuentes fijas, particularmente con las emisiones provenientes del sector residencial, siendo este el responsable de la mayor cantidad de emisiones atmosféricas (con un 80% de incidencia mínima en la emisión de cada contaminante atmosférico, exceptuando el caso de los SOx).

Haciendo un análisis de los datos de combustibles utilizados por el sector residencial, es posible apreciar que la gran mayoría de las emisiones de MP2,5 provienen del uso de leña como combustible (90,78%), superando ampliamente a otros como el GLP y el Kerosene (Ver figura 7). Esto evidencia el consumo

intensivo de leña para calefacción presente en la comuna en comparación con el resto de combustibles.

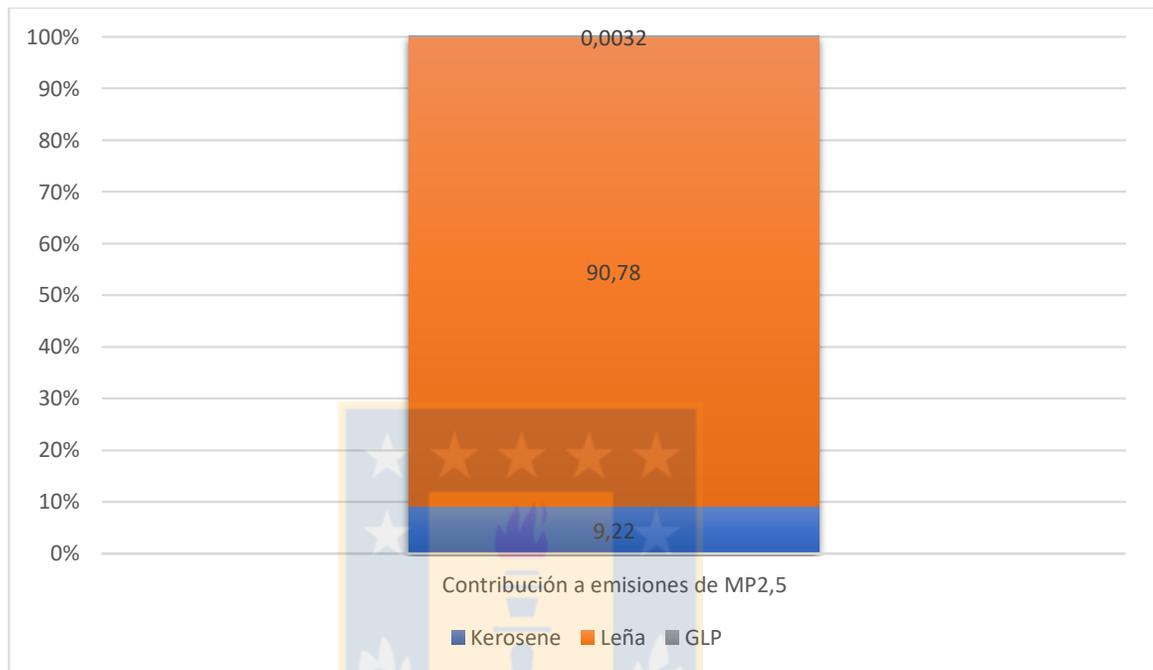


Figura 11: Distribución porcentual de emisiones de MP2,5 en combustibles residenciales, comuna de San Carlos.

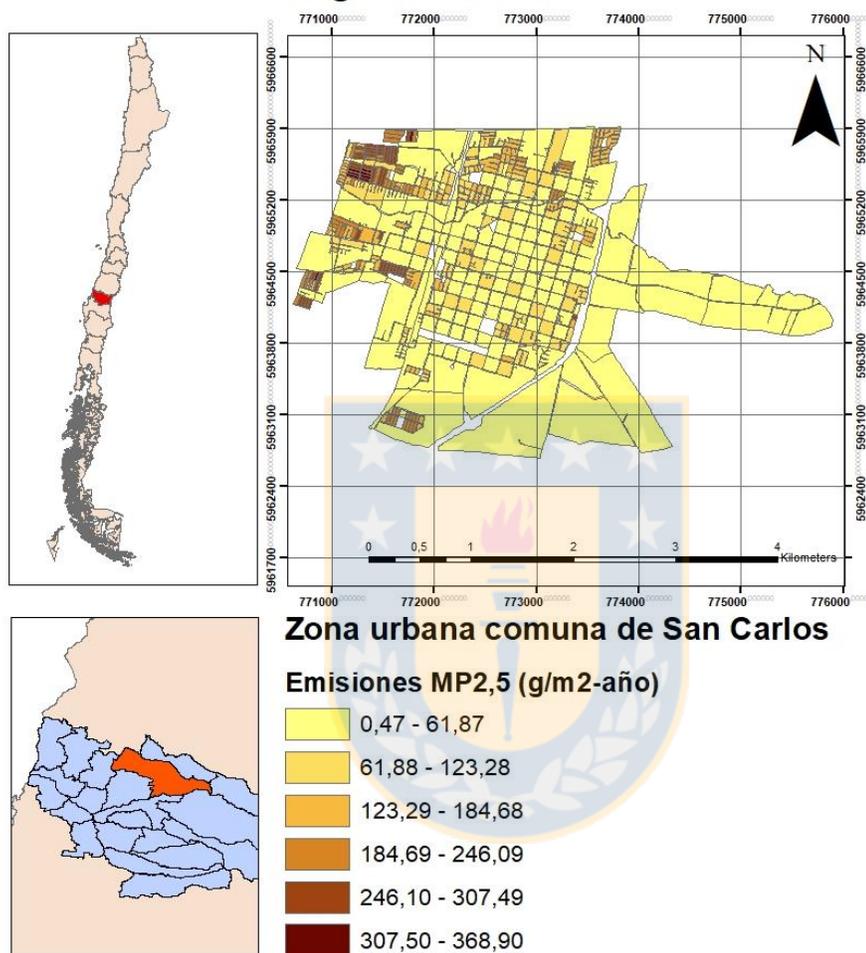
Fuente: Elaboración propia.

Debido a esto, el sector residencial se identifica como la principal fuente de contaminación del aire en la comuna, básicamente por el gran consumo de leña para calefacción a través de equipos poco eficientes y altamente contaminantes.

4.2. Propuesta preliminar de medidas de gestión de la calidad del aire en la comuna de San Carlos, focalizando las emisiones de MP2.5

A partir de la principal fuente identificada, las zonas de mayor emisión determinadas según las manzanas del CENSO 2017 fueron las siguientes

San Carlos
Provincia de Punilla
Región de Ñuble



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Densidad de emisiones de MP2,5 para el sector residencial, comuna de San Carlos.

Según la figura anterior, se visualiza que en la mayor parte de la zona urbana existen bajas cantidades de emisiones. Sin embargo, a medida que nos distanciamos del centro de la ciudad, las emisiones tienden a ser mayores. De

este modo, es posible decir que las mayores cantidades de emisiones residenciales se generan en los suburbios de la ciudad, siendo el extremo noroeste de la zona urbana el sector más contaminante.

Al observar imágenes satelitales de la comuna y contrastarlas con la cartografía elaborada, es posible dar cuenta de las edificaciones y/o viviendas existentes en aquellas zonas de mayor contaminación.

De este modo, se identifica una alta densidad de viviendas en los sectores de mayor contaminación (Ver figura 10), dando a entender que corresponderían a viviendas cuya principal fuente de calefacción correspondería a leña, lo cual explicaría porque corresponde a una zona de mayor densidad de emisiones de MP_{2,5}



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Figura 13: Fotografía aérea de la zona urbana de San Carlos.

Los sectores identificados como mayormente contaminantes deben ser considerados a la hora de implementar cualquier medida de gestión, como forma de orientar sus beneficios a aquellos lugares más críticos.

A continuación, se presenta el potencial de reducción de emisiones por equipo y total, el indicador \$/ton MP2,5 reducida y la factibilidad de cada medida preliminar propuesta.

1. Recambio de calefactores por equipos a leña certificados

Tabla 37: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 1.

Equipo	Calefactor certificado DS N°39/2011	Cantidad de artefactos	Reducción anual MP2,5 (ton/año)	Porcentaje de reducción
	Reducción MP2,5 (ton/año-hogar)			
Combustión lenta de cámara simple	0,034	2870	97,58	70,8%
Combustión lenta de cámara doble	0,020	2610	52,2	76,5%
Salamandra	0,032	1392	44,54	91,1%
TOTAL	-	6842	194,32	76,2%

Fuente: Elaboración propia

Bajo el supuesto de un recambio del 100% de los artefactos seleccionados y de que solo existe un artefacto de calefacción por vivienda, el potencial de reducción es de 194,32 ton/año, lo cual se traduce en una reducción del 76,2% de las emisiones de MP2,5 por parte de estos equipos, y a su vez, una reducción de

31,9% de las emisiones totales de dicho contaminante provenientes del sector residencial.

En términos de factibilidad, esta medida es bastante realizable por diversos motivos. Los calefactores certificados por el DS N°39/2011 corresponden a tecnología disponible en el mercado nacional y puede ser fácilmente subvencionada por el Estado de modo que estos equipos puedan ser accesibles para la población. Además, es aconsejable implementar talleres y campañas de concientización acerca de la contaminación del aire en San Carlos en paralelo con esta medida, promoviendo así el recambio de los artefactos existentes y poco eficientes por otros nuevos, más eficientes y menos contaminantes.

Tabla 38: Indicador preliminar de costo por tonelada para primera medida.

Medida	Costo total de inversión por equipo actualizado (\$)	N° de viviendas	Costo total de inversión (\$MM)	Indicador (\$MM/ton reducida de MP2,5)
1	738.560	6842	5053,23	26

Fuente: Elaboración propia

2. Recambio por calefactores a pellets

Tabla 39: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 2.

Equipo	Estufa a pellet		Reducción anual MP2,5 (ton/año)	Porcentaje de reducción
	Reducción MP2,5 (ton/año-hogar)	Cantidad de artefactos		
Combustión lenta de cámara simple	0,037	2870	106,19	77,1%
Combustión lenta de cámara doble	0,023	2610	60,03	88,0%
Salamandra	0,034	1392	47,33	96,8%
TOTAL	-	6842	213,55	83,8%

Fuente: Elaboración propia

Considerando un recambio completo de los equipos seleccionados, el potencial de reducción total alcanza un valor de 213,55 ton/año de MP2,5, lo cual representa una reducción del 83,8% de las emisiones originadas por dichos artefactos, y un 35,1% de las emisiones totales del sector residencial.

En cuanto a su factibilidad, al igual que la primera medida propuesta, se considera una gestión posible. Esto debido a que se cuenta con tecnología de pellets en el mercado nacional, el cual posee una gran variedad de equipos disponibles con diferentes precios. Sin embargo, a pesar de ser considerada una medida mejor en cuanto a su potencial de reducción, resulta ser bastante más cara, debido a la tecnología que utiliza. Además, para que sea realmente efectiva, es necesario generar un mercado de pellets para garantizar el abastecimiento y el uso de estos equipos, lo cual implicaría un costo adicional por parte del Estado.

Tabla 40: Indicador preliminar de costo por tonelada para segunda medida.

Medida	Costo total de inversión por equipo actualizado (\$)	N° de viviendas	Costo total de inversión (\$MM)	Indicador (\$/ton reducida de MP2,5)
2	1.627.140	6842	11132,89	52,13

Fuente: Elaboración propia

3. Mejoramiento de la aislación térmica de las viviendas

Tabla 41: Potencial de reducción de emisiones por hogar y total para la medida 3.

Equipo	Mejoramiento térmico de viviendas	Cantidad de artefactos	Reducción anual MP2,5 (ton/año)	Porcentaje de reducción
	Reducción MP2,5 (ton/año-hogar)			
Combustión lenta de cámara simple	0,0072	2870	20,66	15,0%
Combustión lenta de cámara doble	0,0039	2610	10,18	14,9%
Salamandra	0,0053	1392	7,38	15,1%
TOTAL	-	6842	38,22	15,0%

Fuente: Elaboración propia

El potencial de reducción de emisiones máximo estimado para esta medida asciende a 38,22 ton/año, siendo así la medida con el potencial más bajo de entre las tres. Dicho valor es equivalente a una reducción del 15% de las emisiones

provenientes de los artefactos seleccionados, que a su vez corresponde a una reducción de 6,3% del MP2,5 total originado por el sector residencial.

En cuanto a su factibilidad, se considera una medida realizable, dado que corresponde a un subsidio que actualmente se otorga en Chile y que consta de una cobertura total a los gastos de mejoramiento térmico, siendo accesible exclusivamente para viviendas sociales o para aquellas que no superen las 650 UF de tasación.

Sin embargo, no posee un gran impacto en cuanto a su reducción de emisiones, por lo cual se considera una medida transversal respecto de las primeras dos, debido a los efectos sinérgicos positivos que se pueden conseguir.

Tabla 42: Indicador preliminar de costo por tonelada para tercera medida.

Medida	Costo total de inversión por equipo actualizado (\$)	N° de viviendas	Costo total de inversión (\$MM)	Indicador (\$/ton reducida de MP2,5)
3	3.000.000	6842	20560	537,05

Fuente: Elaboración propia

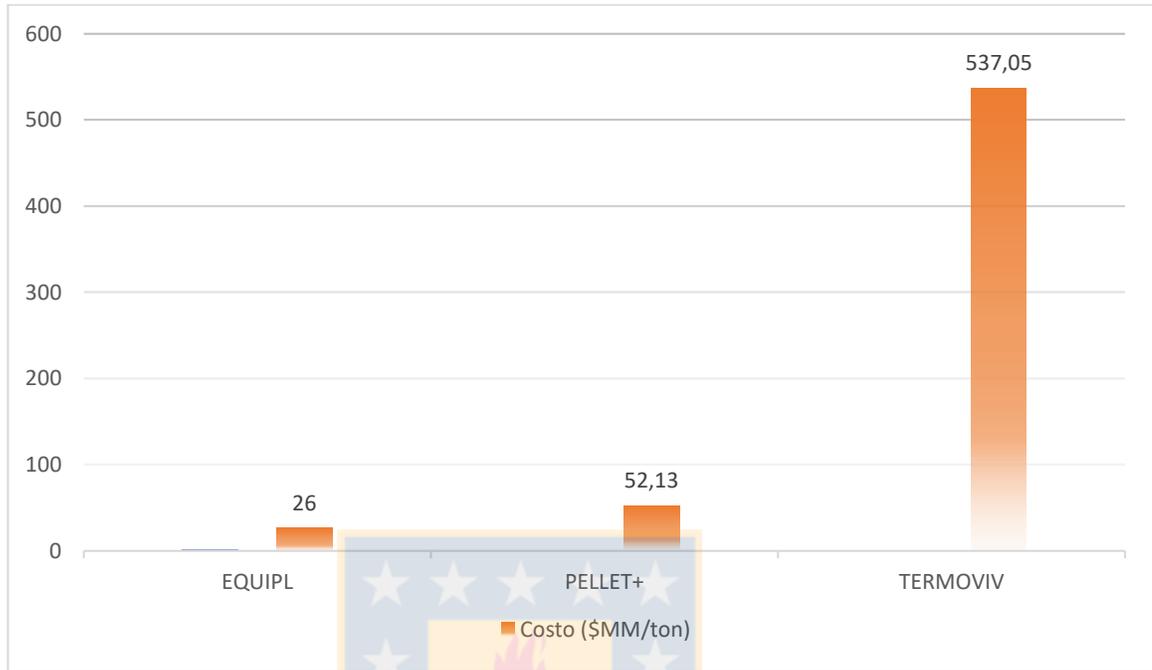


Figura 14: Contraste de indicador de \$MM/ton reducida de MP2,5

Fuente: Elaboración propia.

En términos preliminares, la medida 1 resulta ser la más atractiva económicamente para la reducción de emisiones de MP2,5, esto debido al considerable potencial de reducción que posee a bajo costo en comparación con las otras medidas.

Si bien, es la medida con el mayor potencial de reducción de emisiones de entre las formuladas, la medida 2 resulta ser menos atractiva económicamente debido a los mayores costos asociados a la tecnología de pellet.

Dado lo anterior, si se desea una alternativa que sea efectiva y económica para la comuna, se debería optar por 1 antes que por 2. En cambio, si la prioridad es reducir las emisiones lo más posible y contribuir a desmotivar gradualmente el uso de leña, la medida 2 sería más adecuada.

En tanto la medida 3 resulta ser la más costosa y con un potencial de reducción de emisiones mucho más bajo. Debido a esto, dicha medida es la menos atractiva económicamente. Aun así, se podrían obtener mejores resultados si se opta por acompañar con campañas para concientizar a la población respecto de la eficiencia energética en los hogares,

Sin embargo, dado que el uso de calefactores a leña y el consumo intensivo del mismo combustible son los principales responsables del problema de calidad del aire en la ciudad de San Carlos, difícilmente las iniciativas, como las anteriormente presentadas, darían solución definitiva a la situación. Esto debido a que mientras se continúe utilizando leña como combustible habitual para calefacción, San Carlos seguirá estando expuesto a mayores cantidades de MP10 y MP2,5, perpetuando el problema de la calidad del aire.

5. Conclusiones y recomendaciones

El inventario de emisiones calculado señaló al sector residencial como la principal fuente de contaminación en la comuna de San Carlos, debido a su significativa contribución a las emisiones de contaminantes atmosféricos en general, alcanzando un valor mínimo de 80% de incidencia en la mayoría de los contaminantes en estudio (MP10, MP2,5, NO_x, COV y CO).

Las fuentes que destacan como las mayores emisoras de MP2,5 son las fuentes fijas (básicamente sector residencial) y areales (quemados agrícolas e incendios), siendo el aporte de esta última muy bajo en comparación con la primera.

La proporción entre el material particulado grueso (MP10) y material particulado fino (MP2,5) provenientes del sector residencial indica que la mayor parte el MP10 corresponde a fracción de MP2,5 (96,7%), lo cual evidencia el intensivo consumo de leña para calefacción por parte de la población.

En la zona urbana de San Carlos, aquellos artefactos mayormente utilizados corresponden a estufas de combustión simple, de doble cámara y salamandras. Estos, debido a su baja eficiencia y al uso intensivo de leña, originan gran parte de las emisiones estimadas, por lo que fueron seleccionados para proponer las medidas de recambio de equipos.

La densidad de las emisiones atmosféricas provenientes del sector residencial crece en aquellos sectores donde la densidad de viviendas es mayor. Por esta razón los barrios periféricos a la zona urbana corresponden a lugares donde las emisiones de MP2,5 son más densas. Particularmente en el extremo noroeste de la ciudad, transformándose así en un lugar prioritario para cualquier medida a implementar.

Preliminarmente, la medida que posee un mayor potencial de reducción de emisiones de MP2,5 corresponde a la medida 2 siendo capaz de reducir las emisiones anuales del sector residencial en un 35,1%. Sin embargo, la más atractiva en términos económicos es la medida 1, con 26 \$MM/ton y un 31,9% de reducción de emisiones de MP2,5. Esto la hace sin duda la medida más rentable para la situación y por la que se debería optar si se desea reducir emisiones a bajo costo.

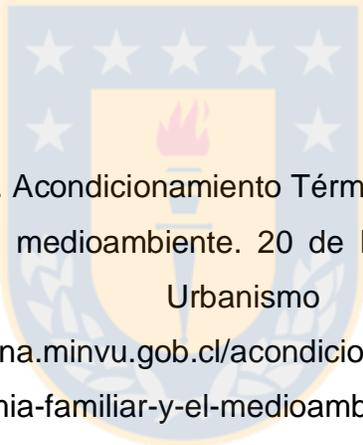
Por otro lado, si se desea abandonar la leña de forma gradual en la comuna, la medida 2 podría resultar más útil y, en el largo plazo, terminar siendo más rentable debido a su alta eficiencia y capacidad de calefacción. Siempre y cuando esta vaya acompañada de un previo desarrollo del mercado de pellets.

Para el caso de la medida 3, por si sola es la más costosa y menos eficiente. Sin embargo, esta se considera una medida igualmente factible a implementar siempre y cuando funcione de manera conjunta con alguna medida de recambio y de que exista educación relativa a la eficiencia energética en el hogar.

A modo de mejorar el inventario elaborado en el presente trabajo, se recomienda recopilar la información faltante de la comuna de San Carlos (distribución de equipos a leña, uso de tipo de leña y parque vehicular), dado que la carencia de dichos datos puede llevar finalmente a sobreestimar o subestimar los valores obtenidos.

Se recomienda evaluar el efecto sinérgico de medidas de mejoramiento térmico en conjunto con medidas de recambio de equipos a modo de conocer la totalidad de los beneficios que se podrían conseguir al combinar medidas.

6. Bibliografía



Alejandro Solís. (2018). Acondicionamiento Térmico: un subsidio que ayuda a la economía familiar y el medioambiente. 20 de Marzo, 2019, de Ministerio de Vivienda y Urbanismo Sitio web: <https://atencionciudadana.minvu.gob.cl/acondicionamiento-termico-un-subsidio-que-ayuda-a-la-economia-familiar-y-el-medioambiente/>

Alex Fernández Muerza. (2008). Efectos Nocivos de los compuestos orgánicos volátiles. 14 de marzo, 2019, de Consumer Sitio web: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2006/11/13/157193.php

ATSDR. (2016). Resúmenes de salud pública- hidrocarburos totales del petróleo. 14 de marzo, 2019, de Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades Sitio web: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html

Chafe, Z., Brauer, M., Heroux, M.-E., Klimont, Z., Lanki, T., Salonen, R.O., Smith, K.R., 2015. Residential Heating with Wood and Coal: Health Impacts and Policy Options in Europe and North America. World Health Organization Regional Office for Europe, Bonn, Germany.

Comisión Nacional del medio Ambiente, CONAMA, (2010). Informe final relación de la norma de calidad primaria MP2,5 con la norma de calidad primaria de MP10. Preparado por Luis Cifuentes. Santiago: CONAMA.

Consejería de Salud de la Región de Murcia. (s.f.). Monóxido de carbono. 14 de Marzo, 2019, de Murcia+Salud Sitio web: <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180398#>

Ernesto Martínez Ataz y Yolanda Díaz de Mera Morales. (2004). I. En Contaminación atmosférica (13). España: Universidad de Castilla-La Mancha

Guaita R, Pichiule M, Mate T, Linares C, Diaz J. Short-term impact of particulate matter (PM_{2.5}) on respiratory mortality in Madrid. Int J Environ Health Res 2011;21:260–74.

Kim, K.H., Kabir, E., Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environ. Int. 74, 136-143.

K. Laaidi, A. Economopoulou, V. Wagner, M. Pascal, P. Empeureur-Bissonnet, A. Verrier, P. Beaudeau. (2013). Cold spells and health: prevention and warning. *Public Health*, 127, 492-499.

Ministerio del Medio Ambiente, 2011. Análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de revisión de la norma de emisión de NO, HC y CO para el control del NOx en vehículos en uso, de encendido por chispa (AGIES). Santiago: MMA.

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Informe de Estado del Medio Ambiente. Chile: MMA.

Organización Mundial de la Salud. (s.f). Información básica sobre la contaminación atmosférica urbana. Revisado el 10 de Junio, 2018, de OMS Sitio web:

http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_information/es/index2.html

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Suiza: Ediciones OMS

Pope, C. A., 3RD y Dockery, D. W., (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6): 709-742.

Shah ASV, Langrish JP, Nair H, McAllister DA, Hunter AL, Donaldson K, et al. Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet* 2013;382:1039–48

Susana López-Aparicio, Matthias Vogt, Philipp Schneider, Maarit Kahila-Tani, Anna Broberg. (2017). Public participation GIS for improving wood burning emissions from residential heating and urban environmental management. *Journal of Environmental Management*, 191, 179-188.

SoCalGas. (s.f.). El metano y la salud y seguridad. 14 de marzo, 2019, de SoCalGas Sitio web: <https://www.socalgas.com/es/stay-safe/methane-emissions/methane-and-health-and-safety>

World Health Organization (WHO). Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2013 [http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf, Visitado el 11 de Julio, 2018].

Xilian Luo, Qibo Hou , Yuanguang Wang , Dongtan Xin , Hui Gao , Min Zhao , Zhaolin. (22 October, 2017). Experimental on a novel solar energy heating system for residential buildings in cold zone of China. *Procedia Engineering*, 205, 3061–3066.

