



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS  
AMBIENTALES

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA  
COMUNA DE CURANILAHUE. CARACTERIZACIÓN  
DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE  
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y PROPUESTA DE  
MEDIDAS DE GESTIÓN



Habilitación profesional presentada para optar al título de  
**Ingeniero Ambiental**

**NICOLÁS PATRICIO CONTRERAS MUÑOZ**

**Profesora Guía**

**Dra. Claudia Ulloa Tesser**

Concepción, Chile

2019

**“Diagnóstico de la calidad del aire en la comuna de Curanilahue.  
Caracterización de las principales fuentes de contaminación atmosférica y  
propuesta de medidas de gestión”.**

**PROFESOR GUÍA:**

**Dra. CLAUDIA ULLOA TESSER**

**PROFESOR CO-GUÍA:**

**Dr. JORGE JIMENEZ 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**



100 AÑOS  
DE  
DESARROLLO  
LIBRE DEL  
ESPIRITU

## TABLA DE CONTENIDOS

Índice de Figuras .....	iii
Índice de Tablas.....	iv
RESUMEN.....	vi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivos.....	4
1.1.1    Objetivo General .....	4
1.1.2    Objetivos Específicos.....	4
2. ANTECEDENTES .....	5
2.1    Contaminación Atmosférica.....	5
2.2    Calidad del aire en Chile.....	7
2.3    Calidad del Aire en la Región del Biobío.....	10
2.4    Normativa que regula la Calidad del Aire en Chile .....	11
2.5    Antecedentes comuna de Curanilahue .....	13
2.6    Condiciones actuales de la calidad del aire en Curanilahue.....	14
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1    Diagnóstico de la Calidad del Aire en la Comuna de Curanilahue.....	17
3.2    Estimación de las Emisiones Atmosféricas en la Comuna de Curanilahue .....	17
3.2.1    Estimación emisiones atmosféricas del sector industrial, comercial e instituciones.....	18
3.2.2    Estimación emisiones atmosféricas por incendios forestales.....	19
3.2.3    Estimación emisiones atmosféricas por fuentes móviles .....	24

3.2.4	Estimación Emisiones del Sector Residencial.....	26
3.3	Medidas de gestión tendientes a mejorar la calidad del aire .....	30
3.3.1	Estimación de la reducción en la concentración ambiental de MP <sub>2.5</sub> . .....	30
3.3.2	Propuesta reducciones de emisiones y concentración P98 de MP <sub>2.5</sub> .....	31
3.3.3	Estimación de los costos de reemplazar calefactores a leña .....	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1	Diagnostico calidad del aire .....	33
4.2	Inventario de Emisiones Atmosféricas en la Comuna de Curanilahue .....	36
4.2.1	Detalle de las principales fuentes de MP <sub>2.5</sub> en la comuna de Curanilahue.....	37
4.3	Medidas gestión tendientes a mejorar las condiciones actuales de la calidad del aire .....	42
4.3.1	Reducción en la concentración ambiental de MP <sub>2.5</sub> .....	43
4.3.2	Propuesta reducciones de emisiones y concentración P98 de MP <sub>2.5</sub> .....	44
4.3.3	Costos de recambio de calefactores a leña .....	51
4.3.4	Medidas de gestión para incendios forestales .....	51
5.	CONCLUSIONES.....	53
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
7.	ANEXOS .....	58

## Índice de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de la comuna de Curanilahue.....	2
Figura 2. Descripción general del proceso de contaminación atmosférica .....	6
Figura 3. Promedio anual de concentraciones de MP <sub>2.5</sub> a nivel nacional, año 2016. .....	9
Figura 4. Comunas declaradas saturadas por MP en la región de Biobío y Ñuble .....	10
Figura 5. Mapa de elevaciones en la comuna de Curanilahue.. ..	14
Figura 6. Datos crudos estación de monitoreo balneario Curanilahue.....	15
Figura 7. Principales fuentes emisoras consideradas a estimar. ....	18
Figura 8. Distribución de las fuentes de combustión residencial en la zona urbana. .....	29
Figura 9. Promedio de la concentración anual de MP <sub>2.5</sub> en la estación de monitoreo de calidad de aire balneario Curanilahue.....	34
Figura 10. Percentil 98 de la concentración diaria de MP <sub>2.5</sub> en la estación de monitoreo de calidad de aire balneario Curanilahue.....	34
Figura 11. Evolución de las concentraciones diarias de MP <sub>2.5</sub> en la estación balneario Curanilahue.....	35
Figura 12. Aporte de cada fuente al total de las emisiones.....	37
Figura 13. Emisiones sector industrial según fuentes generadoras. ....	38
Figura 14. Ubicación geográfica de las fuentes industriales y comerciales. ....	39
Figura 15. Distribución emisiones de MP <sub>2.5</sub> en zona urbana de Curanilahue.....	40
Figura 16. Emisiones de MP <sub>2.5</sub> por quintil de ingreso.....	41
Figura 17. Emisiones de MP <sub>2.5</sub> por incendios forestales, según tipo de superficie quemada. ....	42
Figura 18. Reducción en las emisiones y percentil 98 de MP <sub>2.5</sub> .....	44
Figura 19. Zona de intervención propuesta para recambio de calefactores.....	49
Figura 20. Nivel de emisiones MP <sub>2.5</sub> actual vs emisiones con intervención.....	50

## Índice de Tablas

Tabla 1. Valores límite para contaminantes atmosféricos según directrices de la OMS.....	7
Tabla 2. Límites normas primarias de calidad del aire para contaminantes criterio. .....	12
Tabla 3. Factores de Emisión utilizados en fuentes industriales y comerciales. ...	19
Tabla 4. Promedio anual últimos 10 años (2008-2018) de área consumida según tipo de vegetación.....	21
Tabla 5. Factores de emisión según tipo de vegetación (Kg/ton).....	21
Tabla 6. Factores de emisión para pastizales (Kg/ton). ....	22
Tabla 7. Factores de carga para plantaciones forestales y bosque nativo.....	22
Tabla 8. Factores de carga para pastizales y arbustos.....	23
Tabla 9. Equivalencia entre las categorías i de la metodología y las categorías entregadas por el INE. ....	25
Tabla 10. Valores de kilómetros promedio y velocidad promedio para cada tipo de vehículo, en ciudades con parque vehicular menor a 25000. ....	26
Tabla 11. Consumos de combustibles en Curanilahue. ....	27
Tabla 12. Factores de emisión para GLP.....	28
Tabla 13. Factores de emisión para Kerosene .....	28
Tabla 14. Factores de emisión para Leña Seca (g/kg).....	28
Tabla 15. Factores de emisión para Leña Húmeda (g/kg). ....	28
Tabla 16. Medidas propuestas para lograr meta de reducción de emisiones .....	32
Tabla 17. Costos calefactores a leña certificados y calefactores a pellet .....	32
Tabla 18. Resumen de emisiones atmosféricas en la comuna de Curanilahue, según tipo de fuente. ....	36
Tabla 19. Emisiones sector industrial y comercial según fuente de emisión.....	38
Tabla 20. Metas de reducción de emisiones y concentraciones en un plazo de 10 años respecto al escenario actual.....	43

Tabla 21. Metas de reducción de emisiones de MP <sub>2.5</sub> propuesta a sector residencial e industrial.....	45
Tabla 22. Límite máximo de emisión de Material Particulado para calderas existentes.....	46
Tabla 23. Medidas propuestas para lograr reducción de emisión en el sector residencial.....	47
Tabla 24. Costos de realizar el recambio de calefactores.....	51
Tabla 25. Medidas de prevención y combate del fuego en incendios forestales .....	52



## RESUMEN

En la zona urbana de la comuna de Curanilahue, actualmente se presentan indicios de mala calidad del aire, en la comuna se reúnen factores desfavorables para la calidad del aire, como su geografía y la alta penetración de la leña para calefacción residencial.

En este estudio se realiza un diagnóstico del estado actual de la calidad del aire, identificando las principales fuentes de emisiones atmosféricas. Se procesaron los datos de calidad del aire disponibles para material particulado fino. Posteriormente, se estimaron las emisiones atmosféricas de material particulado a nivel comunal, utilizando la metodología de factores de emisión. Finalmente, se proponen medidas de gestión tendientes a mejorar la calidad del aire, focalizadas en las fuentes de contaminación que mayor aporte tienen a las emisiones atmosféricas.

Los resultados indican que se supera el límite normativo de la norma diaria ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) para material particulado fino, registrando un Percentil 98 de  $117 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en el año 2018. Para el límite normativo anual ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), se supera con  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  (años 2016, 2017 y 2018). Las emisiones totales de material particulado fino fueron 367,9 (Ton/año), de las cuales el 71% corresponden al sector residencial y el 20% al sector industrial. A través del cálculo del factor emisión - concentración (FEC) se determinó que debe haber una reducción de un 60% en las emisiones de  $\text{MP}_{2.5}$  para dar cumplimiento a la norma primaria de este parámetro. Se estimó que para lograr esta meta de reducción se necesita hacer un recambio del 90% por calefactores certificados a leña, pero este escenario solo se cumple con una correcta manipulación del artefacto y una humedad de la leña óptima, factores que son prácticamente imposibles de fiscalizar. También se estimó que se puede lograr dicha reducción a través del recambio al 80% de calefactores a pellet, lo cual es una medida acorde a las necesidades de calidad del aire de la comuna, ya que, a diferencia de la leña, el pellet no presenta problemas de humedad. El costo estimado de las reducciones asciende a \$13,5 millones por tonelada de  $\text{MP}_{2.5}$  reducida en el caso de los calefactores certificados y \$25,4 millones en el caso de los calefactores a pellet.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en Chile, es un problema transversal que afecta a la mayoría de sus habitantes. La exposición crónica a material particulado contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón (OMS, 2016). Según el último Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2017), en Chile al menos 10 millones de personas están expuestas a una concentración promedio anual de MP<sub>2.5</sub> superior a 20 µg/m<sup>3</sup>. Además, según el mismo reporte, se estima que más de 3.700 personas mueren prematuramente al año por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, asociadas a la exposición crónica a MP<sub>2.5</sub>. En el caso de las regiones Biobío y Ñuble, se encuentran declaradas como zona saturada por material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) y respirable (MP<sub>10</sub>) las ciudades más grandes, entre ellas Concepción Metropolitano<sup>1</sup>, Los Ángeles, Chillan y Chillan Viejo. Según inventarios de emisiones realizados en Concepción Metropolitano, la combustión de leña para calefacción residencial es el principal causante de las altas concentraciones de material particulado, en segundo lugar, se encuentra el sector industrial, dependiendo de la actividad de este rubro en cada comuna (SICAM, 2013).

La comuna de Curanilahue es un área geográfica ubicada en la Provincia de Arauco, Región del Biobío. Su actividad económica se basa principalmente en el sector forestal, el cual utiliza el 89% del terreno con uso de suelo agrícola para la silvicultura (UBB, 2015). Respecto a su geografía, la zona urbana, la cual concentra el 93% de las viviendas (CENSO, 2017), se encuentra emplazada en un valle rodeado por cerros.

---

<sup>1</sup> Comprende las comunas de Concepción, Chiguayante, Talcahuano, Hualpen, Hualqui, Penco, Tome, San Pedro de la Paz, Lota y Coronel.



**Figura 1. Localización geográfica de la comuna de Curanilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

En la Provincia de Arauco, específicamente en la comuna de Curanilahue, aún no se han realizado estudios de calidad del aire, pero en la comuna existe una Estación de Monitoreo de Calidad del Aire del SINCA<sup>2</sup>, la cual se ubica en la zona urbana y tiene una data de registros de concentración ambiental de MP<sub>2.5</sub> desde el año 2013 a la fecha. Los registros de esta estación, indican que la comuna presenta escenarios de mala calidad del aire especialmente en los meses de invierno.

<sup>2</sup> Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, Estación balneario Curanilahue.

Este trabajo pretende aportar al inicio en la generación de un diagnóstico de calidad del aire y emisiones atmosféricas para la comuna de Curanilahue.



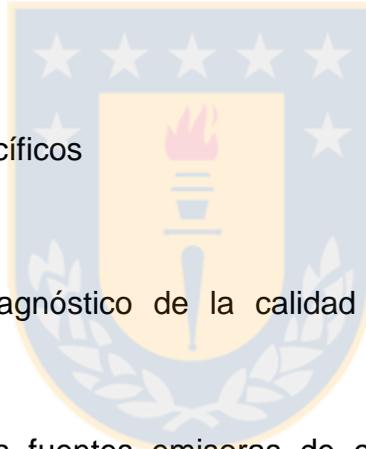
## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Caracterizar el estado de la calidad del aire en la comuna de Curanilahue, con el objeto de evaluar medidas de gestión tendientes a reducir la concentración ambiental de  $MP_{2.5}$ .

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico de la calidad del aire para la comuna de Curanilahue.
- Caracterizar las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos de Curanilahue.
- Evaluar de medidas de gestión tendientes a mejorar las condiciones actuales de la calidad del aire en la zona urbana de Curanilahue.

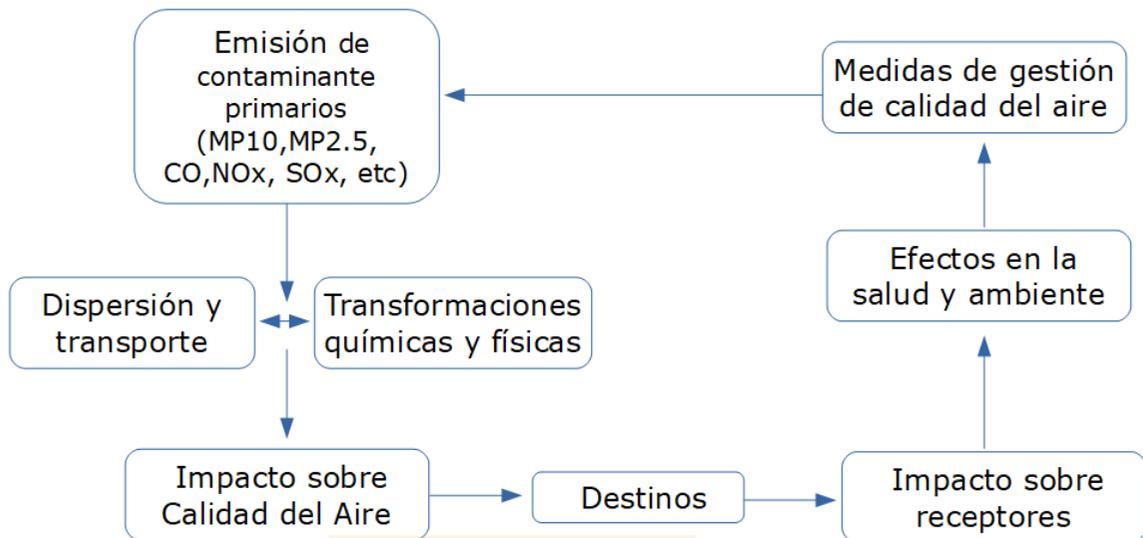


## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica se define como la presencia de ciertas sustancias en el aire, en concentraciones, niveles o permanencia lo suficientemente altos como para constituir un riesgo a la salud, la calidad de vida de la población, la preservación de la naturaleza y/o la conservación del patrimonio ambiental (Zaror, 2000). En Figura 2 se observa una descripción general del proceso de contaminación del aire según Pitts & Pitts (2000). Fuentes antropogénicas y naturales emiten a la atmosfera contaminantes primarios, como material particulado respirable y fino ( $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ ), Óxidos de nitrógeno y azufre ( $NO_x$  y  $SO_x$ ), monóxido de carbono (CO), etc. Estos contaminantes pueden sufrir el transporte, dispersión y múltiples transformaciones químicas y físicas. Las transformaciones químicas consisten en la producción de contaminantes secundarios, tales como ( $NO_2$ ), ácidos ( $HNO_3$ ,  $H_2SO_2$ ), ozono troposférico ( $O_3$ ) y material particulado secundario.

Por otro lado, las físicas consisten en la deposición húmeda y seca de contaminantes, nucleación de nubes y otros. Estos contaminantes sufren transporte y dispersión en el ambiente, causando un impacto sobre la calidad del aire, afectando la salud de las personas y al medio ambiente. Según Jorquera (2008) los efectos de una mala calidad del aire se pueden clasificar según daños en el receptor, pueden ser efectos en la salud de la población, efectos en ecosistemas y agricultura, efectos estéticos, daños a materiales y patrimonio cultural.



**Figura 2. Descripción general del proceso de contaminación atmosférica.**

Fuente: Modificado de Pitts & Pitts (2000)

Los contaminantes atmosféricos más relevantes para la salud de las personas son las referentes al material particulado. Si bien las partículas con un diámetro de 10 micrones o menos ( $\leq MP_{10}$ ) pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones, existen otras partículas aún más dañinas para la salud, que son aquellas con un diámetro de 2,5 micrones o menos ( $\leq MP_{2.5}$ ). Las cuales pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo. La exposición crónica a material particulado contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón (OMS, 2016). En Tabla 1 se pueden observar valores establecidos en las directrices de calidad del aire de la OMS para algunos de los contaminantes criterio.

**Tabla 1. Valores límite para contaminantes atmosféricos según directrices de la OMS.**

<b>Contaminante</b>	<b>Valor establecido en directrices OMS</b>	<b>Periodo de evaluación</b>
Material Particulado fino (MP <sub>2.5</sub> )	25 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio en 24 horas
	10 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio anual
Material particulado respirable (MP <sub>10</sub> )	20 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio en 24 horas
	10 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio anual
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	500 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio en 10 minutos
	20 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio de 24 horas
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	200 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio en 1 hora
	40 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio anual
Ozono (O <sub>3</sub> )	100 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio en 8 horas

Fuente: OMS, 2005

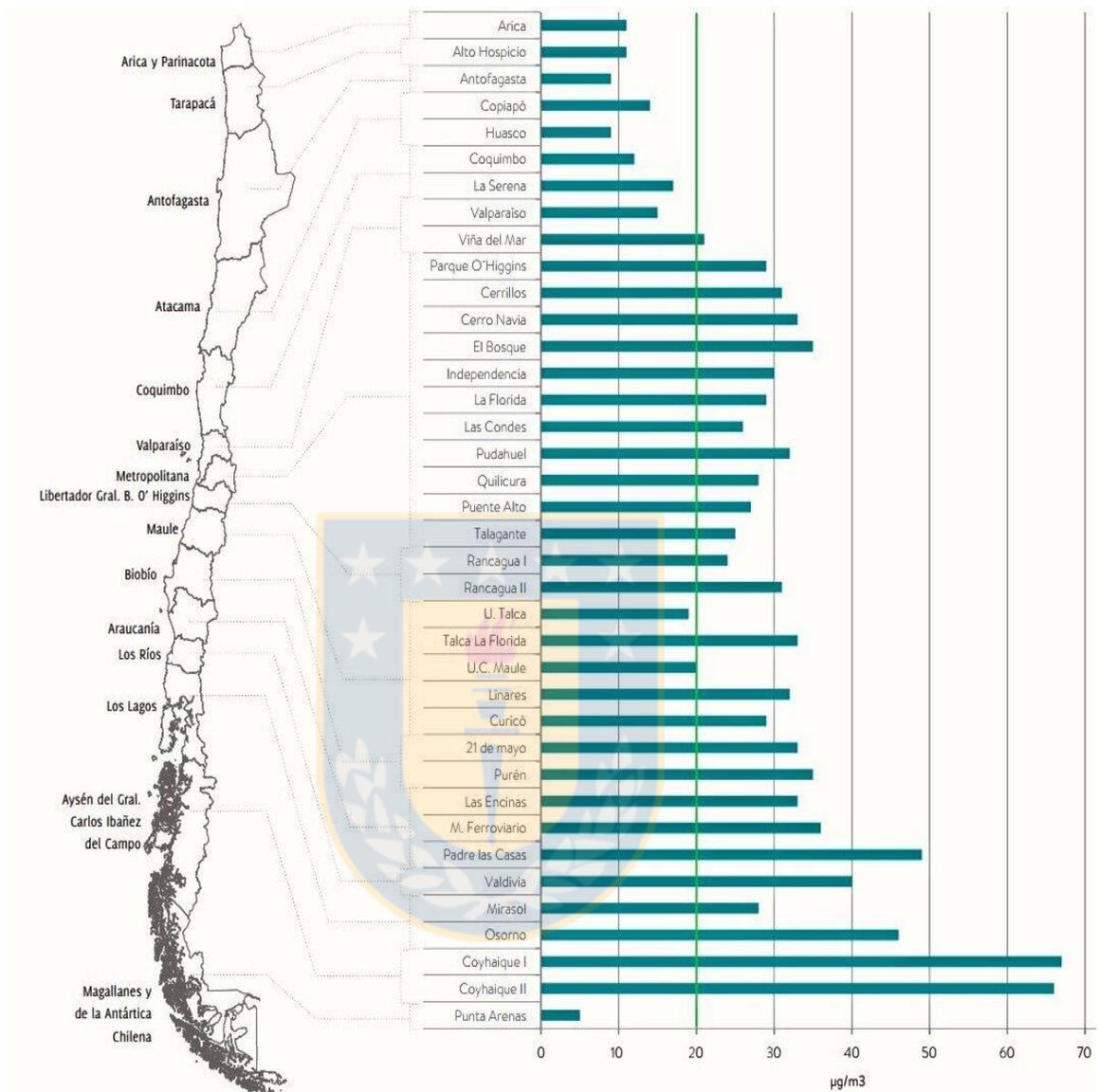
## **2.2 Calidad del aire en Chile**

En Chile, la contaminación atmosférica es un problema que afecta transversalmente a la mayoría de la población, en la zona Norte, se presentan emisiones principalmente de material particulado (MP), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), provenientes de la industria minera y centrales termoeléctricas. En la zona central, predomina la actividad industrial, fuentes móviles y calefacción domiciliaria en los meses de otoño-invierno, además, en los últimos años se han dado recurrentes episodios de incendios forestales, los que empeoran la calidad del aire en los meses de verano. En la zona sur, especialmente en los valles centrales, se registran altas concentraciones de

material particulado en sus fracciones respirable y fina (MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>) en los meses más fríos, producto del alto consumo de leña para calefacción domiciliaria.

Por otro lado, en Chile al menos 10 millones de personas están expuestas a una concentración promedio anual de MP<sub>2.5</sub> superior a 20 µg/m<sup>3</sup>N. Además, se estima que más de 3.700 personas mueren prematuramente al año por enfermedades cardiopulmonares asociadas a la exposición crónica a MP<sub>2.5</sub> (MMA, 2017). En Figura 2 se observa que prácticamente todas las ciudades del centro-sur de Chile, registran niveles de MP<sub>2.5</sub> superiores a los límites máximos establecidos en la normativa.



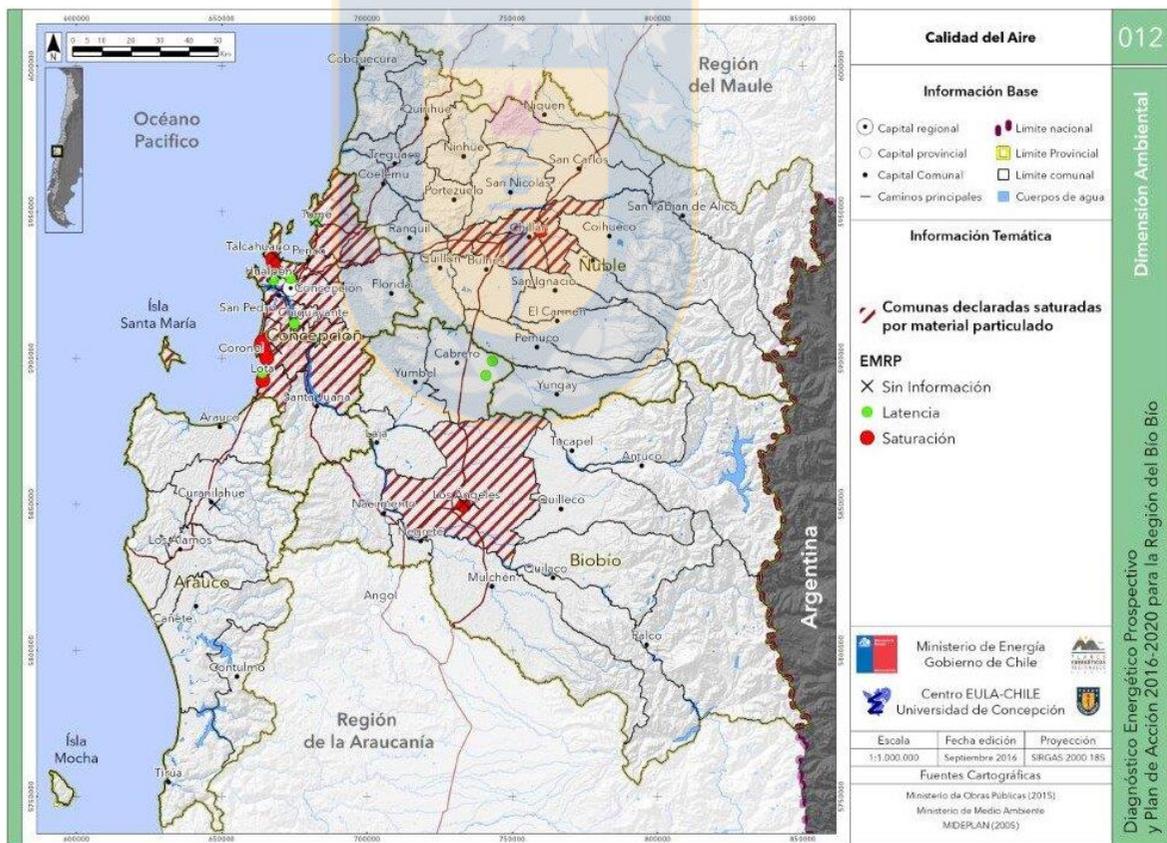


**Figura 3. Promedio anual de concentraciones de MP<sub>2.5</sub> a nivel nacional, año 2016.**

Fuente: MMA, 2017

### 2.3 Calidad del Aire en la Región del Biobío

Uno de los componentes ambientales más críticos de la Región del Biobío es la calidad del aire, principalmente en términos de las concentraciones ambientales de material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) y respirable (MP<sub>10</sub>). En Figura 3 se pueden observar las 13 comunas de la región del Biobío y la nueva región de Ñuble que se encuentran declaradas oficialmente bajo condición de saturación por material particulado: las diez comunas del Concepción Metropolitano, además de Chillán, Chillán Viejo y Los Ángeles (UDEDEC, 2016).



**Figura 4. Comunas declaradas saturadas por MP en la región de Biobío y Ñuble.**

Fuente: Universidad de Concepción, 2016

Las fuentes de emisiones más significativas corresponden a la combustión residencial de leña. La actividad industrial se compone principalmente del desarrollo de los rubros forestal, petroquímico, energético, pesquero, agroindustrial y metal mecánico. Según ITT (2012), la participación de las emisiones de  $MP_{2,5}$  generado por las fuentes industriales de Concepción Metropolitano es de un 22%, el resto del aporte proviene principalmente de la combustión residencial a leña y en menor medida del tránsito vehicular. Lo mismo ocurre en Chillán y Los Ángeles, donde las emisiones de  $MP_{2,5}$  y  $MP_{10}$  son generadas principalmente por la combustión residencial de leña, seguida por industrias, quemas agrícolas e incendios forestales; y, por último, las fuentes móviles (MMA, 2016).

#### **2.4 Normativa que regula la Calidad del Aire en Chile**

La normativa que regula los temas ambientales en Chile es la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300/1994, modificada por la Ley N° 20.417/2010, ambas del Ministerio Secretaría General de la Presidencia). Esta ley, establece en su artículo 32 que las normas de calidad primarias, son aquellas normas de calidad ambiental que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana. Además, que estas normas primarias serán promulgadas mediante decretos supremos y rigen para todo el territorio nacional. En la Tabla 2 se muestran los límites normativos para los contaminantes criterio y el cuerpo legal que los establece.

**Tabla 2. Límites normas primarias de calidad del aire para contaminantes criterio.**

<b>Contaminante primario</b>	<b>Límite normativo</b>	<b>Forma de verificación</b>	<b>Cuerpo Legal</b>
Material Particulado fino (MP <sub>2.5</sub> )	50 µg/m <sup>3</sup> N	Percentil 98 de los valores de un año de monitoreo	D.S. N°12/2011 MMA
	20 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
Material particulado respirable (MP <sub>10</sub> )	150 µg/m <sup>3</sup> N	Percentil 98 de los valores de un año de monitoreo	D.S. N°59/1998 MINSEGPRES
	50 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	250 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio 3 años del percentil 99 de las concentraciones diarias	D.S. N°113/2002 MINSEGPRES
	80 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	400 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio 3 años del percentil 99 de las concentraciones diarias	D.S. N°114/2002 MINSEGPRES
	100 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
Monóxido de carbono (CO)	30 mg/m <sup>3</sup> N	Promedio 3 años del percentil 99 de los máximos diarios de una hora	D.S. N°115/2002 MINSEGPRES
	10 mg/m <sup>3</sup> N	Promedio 3 años del percentil 99 de los máximos promedio de 8 horas	
Ozono (O <sub>3</sub> )	120 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio 3 años del percentil 99 de los máximos promedio de 8 horas	D.S. N°112/2002 MINSEGPRES
Plomo (Pb)	0,5 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio de 2 años consecutivos, si el promedio anual está por sobre el 100% del valor de la norma	D.S. N°136/2000 MINSEGPRES

Fuente: Elaboración propia

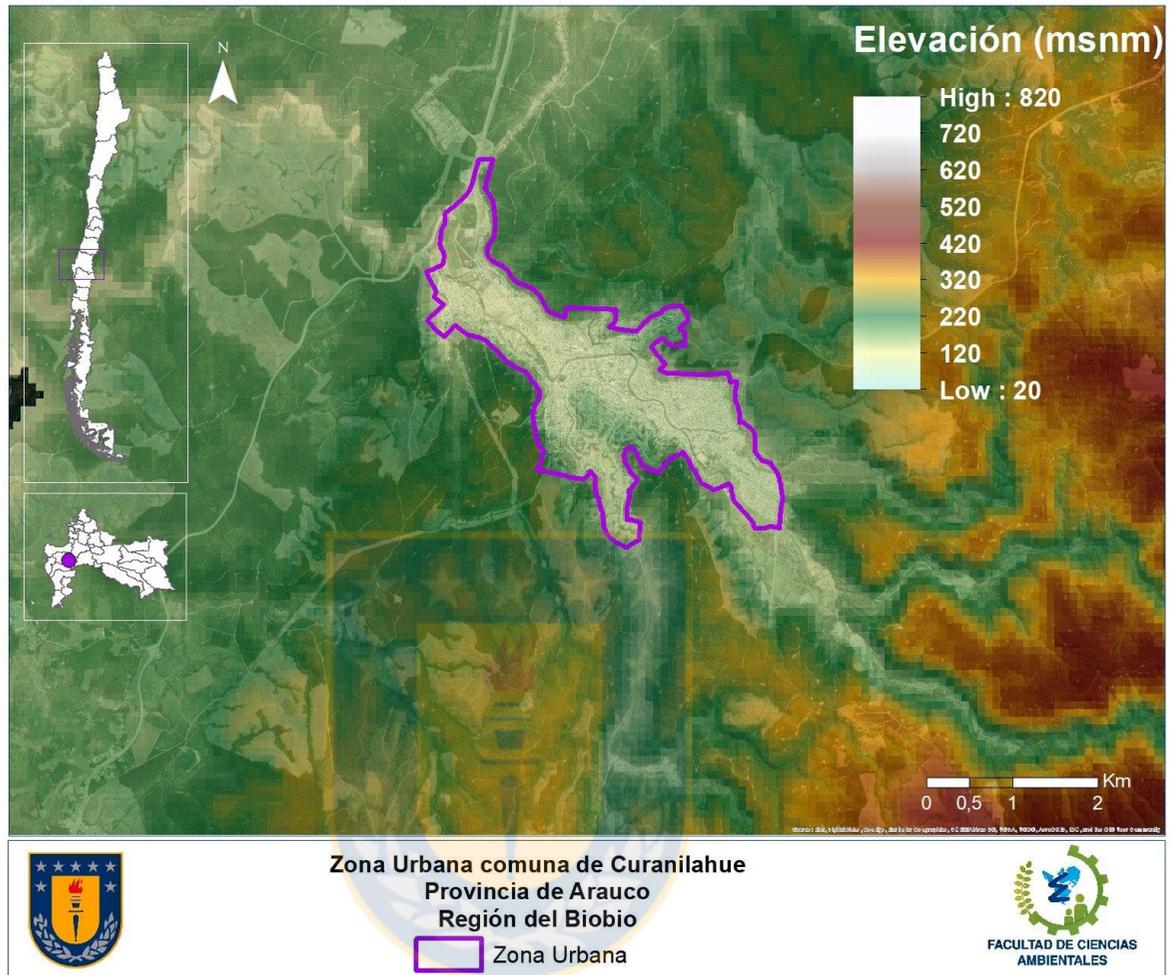
Los datos necesarios para verificar el cumplimiento normativo son medidos a través de Estaciones de monitoreo de representatividad poblacional (EMRP), puestos a disposición por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente, dichas estaciones de monitoreo y los datos registrados deben cumplir con ciertas exigencias para ser validados, estas se detallan en el D.S 61/2008 del Ministerio de Salud.

## 2.5 Antecedentes comuna de Curanilahue

La comuna de Curanilahue se emplaza en la Provincia de Arauco, que es una de las 4 provincias de la Región del Biobío. La superficie total comunal es de 998 Km<sup>2</sup>, de los cuales 5,4 Km<sup>2</sup> corresponden a la zona urbana. Según el último Censo (2017), la población comunal es de 32.288 habitantes, de los cuales el 93% se concentra en la zona urbana, lo que nos entregaría una densidad poblacional en la zona urbana de 5774 personas por Km<sup>2</sup>.

El sector empleos en la comuna de Curanilahue, se concentra principalmente en el Sector Forestal (especialmente en aserraderos), Servicios Comunales, Sociales, Personales y Comercio (UBB, 2015). En cuanto a la situación socioeconómica, según la encuesta CASEN (2015), en la comuna habitan un 17% de hogares en situación de pobreza multidimensional y el ingreso promedio por hogar es de \$547.428. Según el Censo Agropecuario (2007), el 89% del suelo agrícola es utilizado para explotación forestal, siendo este el porcentaje más alto en la región del Biobío.

En cuanto a la geografía, la comuna de Curanilahue presenta una condición física donde predominan formaciones edafológicas como la cordillera de Nahuelbuta con suelos graníticos de lomajes y cerros (Sánchez, 2003). En Figura 5 se puede observar que la zona urbana, tiene condiciones topográficas, que, al estar encajonada en un valle rodeada por cerros, podrían perjudicar la ventilación normal de la ciudad, por lo tanto, se hace necesario gestionar la calidad del aire en la comuna.



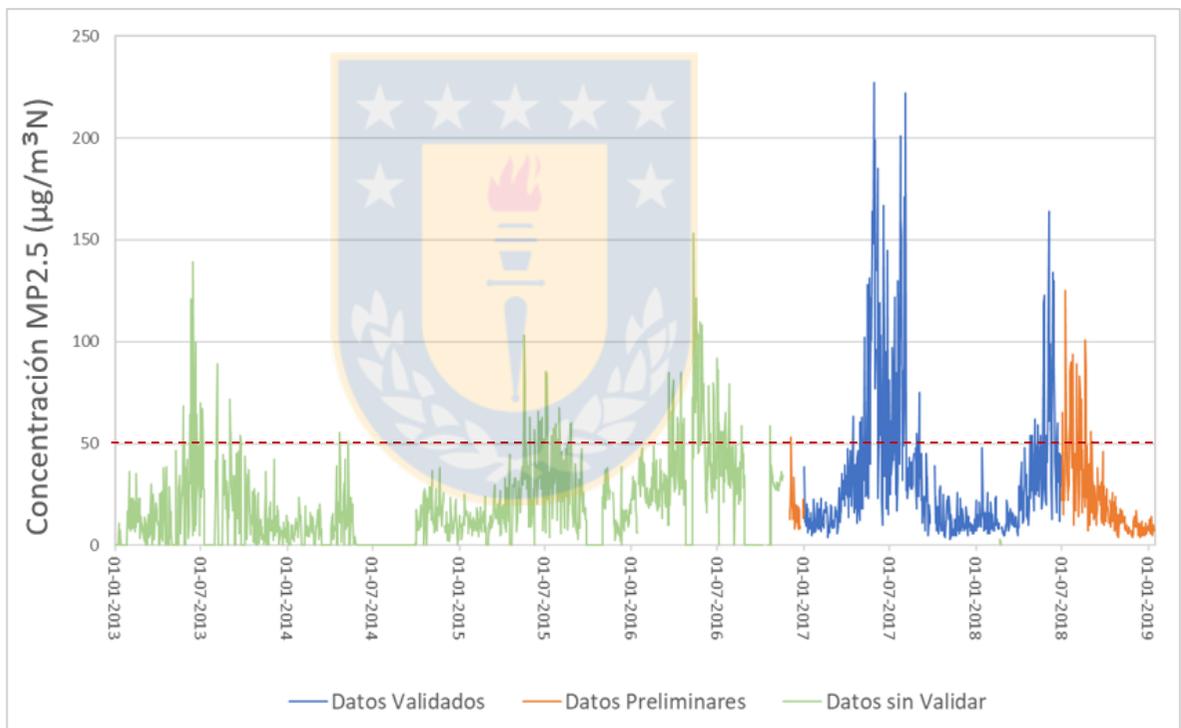
**Figura 5. Mapa de elevaciones en la zona urbana de la comuna de Curanilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

## 2.6 Condiciones actuales de la calidad del aire en Curanilahue

Actualmente, no existen estudios sobre la calidad del aire en la Comuna de Curanilahue, ni de las demás comunas que integran la Provincia de Arauco. Por las condiciones geográficas de la comuna, su alta disponibilidad de leña, ya que se emplaza en una zona de explotación forestal, lo que se verifica con la alta penetración y consumo de leña como combustible para calefacción domiciliaria, 92% y 2.924 (kg/hogar-año) respectivamente según la encuesta CASEN (2015).

La comuna de Curanilahue posee una Estación de Monitoreo de Calidad del Aire del SINCA, la cual tiene una data de registros de MP<sub>2.5</sub> desde el año 2013 a la fecha, pero con gran cantidad de datos sin validar. En Figura 6 se pueden ver los datos crudos registrados por dicha estación de monitoreo, los cuales preliminarmente nos indican un problema de calidad del aire, especialmente en los meses de invierno, que es donde se hace más intensivo el uso de leña para calefacción.



**Figura 6. Datos crudos estación de monitoreo Balneario Curanilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a datos SINCA

Ya expuesta la problemática a la que enfrentan las zonas urbanas de la región del Biobío que no han sido consideradas en los planes de descontaminación, principalmente condiciones topográficas que dificultan la ventilación y la alta penetración y consumo de leña para calefacción residencial. Por estos motivos

se hace necesario comenzar a generar datos de calidad del aire, para futuros planes de descontaminación.



### **3. METODOLOGÍA**

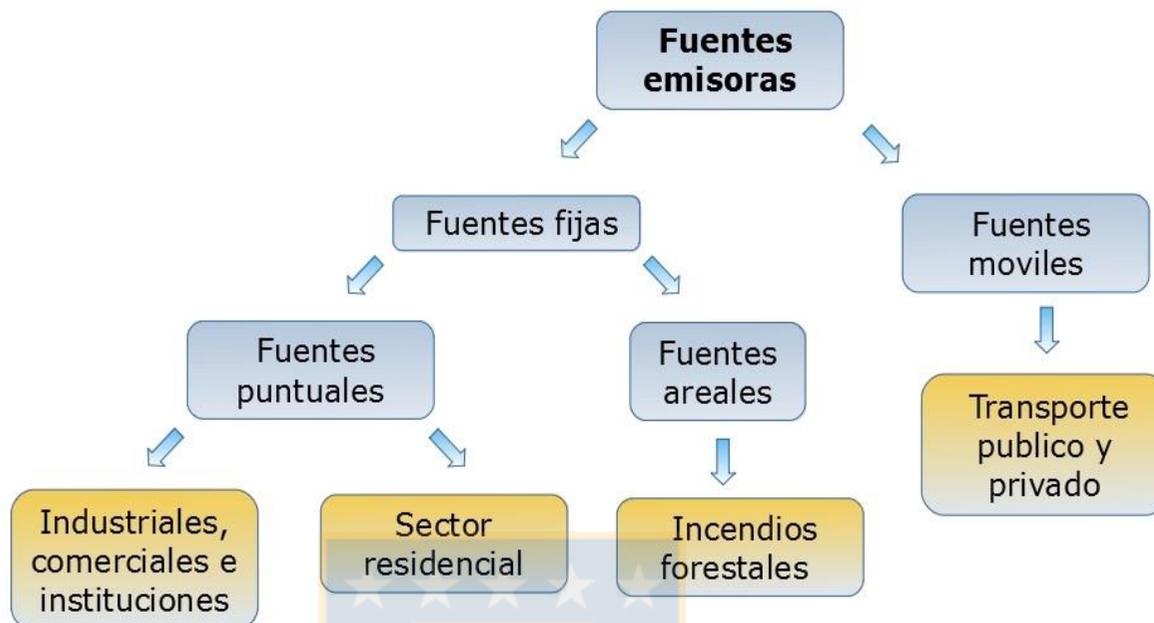
A continuación, se presenta la metodología utilizada para cumplir los objetivos específicos planteados en este informe.

#### **3.1 Diagnóstico de la Calidad del Aire en la Comuna de Curanilahue**

Para diagnosticar el estado actual de la calidad del aire en la comuna de Curanilahue, se procesaron los datos disponibles en la estación de monitoreo de calidad del aire del SINCA. Esto se realizó para el parámetro MP<sub>2.5</sub>, ya que es el único parámetro que cuenta con un periodo considerable de medición de datos, que permite hacer análisis normativo. Para realizar el diagnóstico se verificó la validez de los datos según el Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos (D.S N°61/2008) con el fin de establecer el cumplimiento normativo según la norma primaria de calidad de aire para MP<sub>2.5</sub> (D.S. N°12/2011).

#### **3.2 Estimación de las Emisiones Atmosféricas en la Comuna de Curanilahue**

Con el fin de elaborar un inventario de emisiones atmosféricas a nivel comunal para Curanilahue, se estimaron las emisiones atmosféricas de los contaminantes MP<sub>2.5</sub>, MP<sub>10</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. Los cálculos para todos los contaminantes son en base a factores de emisión y niveles de actividad. En el siguiente esquema se exponen las fuentes emisoras consideradas en este informe.



**Figura 7. Principales fuentes emisoras consideradas a estimar.**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1 Estimación emisiones atmosféricas del sector industrial, comercial e instituciones.

Las emisiones de las fuentes industriales, comerciales e instituciones, se producen al quemar algún tipo de combustible en dichas fuentes, en el caso de Curanilahue, se identifican solo grupos electrógenos y calderas a vapor, a continuación, se describe la metodología de cálculo de emisiones y las fuentes de información.

- Metodología de cálculo de emisiones

Para los cálculos de emisiones se consideró la siguiente ecuación:

$$E_c = FE_c * NA * \left(1 - \frac{Ea}{100}\right)$$

Donde,

$E_c$ = Emisión del contaminante c [Ton/año]

$FE_c$ = Factor de emisión del contaminante c [Ton/Ton de combustible]

NA= Nivel de actividad [Ton/año]

$E_a$ = Eficiencia tecnología de abatimiento [%]

- Niveles de actividad

Los niveles de actividad corresponden al consumo de combustible de cada entidad y este se obtuvo según lo informado por cada una de estas al MINSAL, a través del D.S N°138/2005 del año base 2014. Los detalles de los niveles de actividad se pueden ver en el Anexo 1.

- Factores de emisión

Los factores de emisión fueron obtenidos desde el compendio AP-42 de la EPA. En Tabla 3 se detallan los FE utilizados.

**Tabla 3. Factores de Emisión utilizados en fuentes industriales y comerciales.**

Tipo de fuente	Combustible	Unidad Medida	MP10	MP2.5	CO	NOx	SOx
Caldera Vapor	Madera	Ton/Ton	0,0003	0,0022	0,0038	0,0014	0,0002
Grupo Electrogeno	Diesel	Ton/ton	0,0011	0,0009	0,0165	0,0622	0,0196

Fuente: EPA AP-42 (1998)

### 3.2.2 Estimación emisiones atmosféricas por incendios forestales

Para el cálculo de emisiones por incendios forestales se utilizó la metodología presentada en la Guía Metodológica Inventario de emisiones Atmosféricas (AMBIOSIS S.A., 2011) la cual tiene base en la metodología desarrollada por la

Junta de Recursos del Aire de California en la sección 9.3 de la *Revised Methodology* (CARB, 2004).

- Metodología de cálculo de emisiones

Para los cálculos de emisiones se consideró la siguiente ecuación:

$$E_c = F E_c * A * FC$$

Donde,

$E_c$ = Emisión del contaminante c [Ton/año]

A= Área consumida por incendios forestales [Ha/año]

$FE_c$ = Factor de emisión del contaminante c [Ton/Ton de combustible]

FC= Factor de carga [Ton/Ha]

- Área consumida.

El área combustionada por incendios forestales se obtuvo de los registros históricos de la CONAF, disponibles en su página web. La información publicada entrega datos sobre tipo de vegetación combustionada, donde pastizales, matorrales y bosque nativo se definen como vegetación natural; *Pinus radiata* y *Eucaliptus globulus* se definen como plantaciones forestales. Los incendios forestales son eventos variados en su origen y magnitud, por este motivo se promediaron los datos de área combustionada de los últimos 10 años, obteniendo un estimado y así reducir la variabilidad de un año a otro.

**Tabla 4. Promedio anual últimos 10 años (2008-2018) de área consumida según tipo de vegetación.**

Tipo de vegetación	Plantaciones forestales (Ha/año)				Vegetación natural (Ha/año)		
	<i>Pinus radiata</i> 0-10 años	<i>Pinus radiata</i> 11-17 años	<i>Pinus radiata</i> 18 o mas años	<i>Eucaliptus globulus</i>	Arbolado	Matorral	Pastizal
Promedio anual 2008-2018	0,17	6,29	0,00	5,00	4,87	29,60	8,60

Fuente: Elaboración propia en base a datos CONAF (2018)

- Factores de emisión.

Los factores de emisión utilizados dependen del diámetro de los troncos de los árboles y a estos se les asigno un valor según la edad de las plantaciones. La CONAF entrega la información de la superficie quemada para plantaciones forestales y, además, la edad del cultivo. En tabla 5 se puede ver los FE según tipo de vegetación.

**Tabla 5. Factores de emisión según tipo de vegetación (Kg/ton).**

Tipo de vegetación	MP10	MP2.5	NOx	CO	SOx
Residuos, madera 0-1 in	4,2	3,6	3,7	23,8	1,1
Madera 1-3 in	6,4	5,4	3,6	50,5	1,1
Madera 3+ in	9,8	8,3	3,4	93,3	1,0
Hierba, arbustos	11,4	9,7	3,4	113,0	1,0
Hojarasca, hojas y ramillas	13,8	11,7	3,2	143,4	1,0
Ramas aéreas combustibles	11,4	9,7	3,4	113,0	1,0

Fuente: CARB (2004)

Para las plantaciones de edad entre 0 y 10 años, se asignaron los factores de emisión correspondientes al promedio del rango 0-1 pulgadas y 1-3 pulgadas. Para los rangos 11 a 17 años y 18 años y más, se asignaron los factores de emisión correspondientes al rango 3 y más pulgadas. A la categoría bosque nativo, se le asignan los factores de emisión correspondientes al rango 3 y más pulgadas. En Tabla 6 se pueden ver los FE utilizados para emisiones por pastizales, los cuales se obtuvieron de la metodología para quemas agrícolas de la CARB.

**Tabla 6. Factores de emisión para pastizales (Kg/ton).**

<b>Tipo Vegetacion</b>	<b>MP10</b>	<b>MP2.5</b>	<b>NOx</b>	<b>CO</b>	<b>SOx</b>
Pastizales	7,2	6,8	2,0	114,0	0,6

Fuente: CARB (2005)

- Factores de carga

El factor de carga corresponde a la cantidad de biomasa por hectárea de vegetación. El factor de carga considera que, para cada hectárea de vegetación, hay una parte que corresponde a biomasa arbórea, hojarasca, soto-bosque y necro-bosque, considerando distintos factores de carga para cada una. En Tabla 7 se pueden ver los factores de carga para plantaciones y vegetación natural.

**Tabla 7. Factores de carga para plantaciones forestales y bosque nativo.**

<b>Factores de carga considerados (ton/ha) para plantaciones de <i>Pinus radiata</i></b>				
Edad Plantación	Biomasa arbórea	Hojarasca	Soto-bosque	Necro-bosque
0 a 10 años	9,67	6,58	6,01	8,57
11 a 17años	65,23	3,85	7,75	4,63
>=18 años	103,83	3,29	9,91	3,26
<b>Factores de carga considerados (ton/ha) para plantaciones de <i>Eucalytus globulus</i></b>				
Edad Plantación	Biomasa arbórea	Hojarasca	Soto-bosque	Necro-bosque
0 a 10 años	38,04	7,96	8,15	15,36
11 a 17años	54,14	10,27	11,27	11,85
>=18 años	54,14	10,27	11,27	11,85
<b>Factores de carga considerados (ton/ha) para bosque nativo SV-Costa</b>				
Tipo Bosque	Biomasa arbórea	Hojarasca	Soto-bosque	Necro-bosque
SV Costa	240,4	4,2	22,53	44,2

Fuente: Ambiosis S.A. (2011) a partir del Inventario de biomasa y contabilidad de carbono (Universidad Austral, 2002)

A la biomasa aérea se le asignó el FE de Madera 1-3 pulgadas o Madera 3+ pulgadas, al soto-bosque, el FE de arbustos y a la necromasa el FE de madera 3+ pulgadas. En la Tabla 8 se muestran los factores de carga para arbustos y pastizal.

**Tabla 8. Factores de carga para pastizales y arbustos.**

<b>Especie</b>	<b>Factor de carga (Ton/Ha)</b>
Arbustos	15
Pastizal	4

Fuente: Ambiosis S.A. (2011) en base a datos CONAF

### 3.2.3 Estimación emisiones atmosféricas por fuentes móviles

En la presente sección de utilizo la metodología propuesta en la Guía Metodológica del RETC (2009) para ciudades sin red modelada, que consiste en la aplicación de factores de emisión equivalentes a los utilizados en la metodología para ciudades con red de modelado, pero aplicando kilómetros recorridos y velocidades promedio según el tamaño del parque vehicular de la comuna.

- Metodología de cálculo de emisiones

$$E_c = \sum_i \sum_k FE(V)_{ck} * P_i * C_{ik} * KR_k$$

Donde,

**E<sub>c</sub>**: Emisión total del contaminante “c” para una ciudad de tamaño de parque vehicular “p” [Ton/año].

**FE(v<sub>ip</sub>)<sub>ck</sub>**: Factor de emisión para el contaminante “c” del vehículo “k” evaluada a una velocidad “v” promedio por tipo de vehículo “i”. La v es obtenida a partir de ciudades que cuentan con modelo de transporte [gr/Km].

**PV<sub>i</sub>**: Parque de vehículos tipo “i” [Vehículos].

**C<sub>ik</sub>**: Composiciones vehiculares específicas de la ciudad en estudio, para transformar vehículos tipos “i” en vehículos tipo “k” [%].

**KR<sub>ip</sub>**: Kilómetros promedios recorridos por el tipo de vehículo “i” para una ciudad de tamaño de parque “p” [Km].

- Factores de emisión

Se utilizaron los factores de emisión de la Guía Metodológica del RETC (2009).

- Composición vehicular

Como composición vehicular se utilizaron las entregadas por el parque vehicular del INE, las cuales se pueden ver en Tabla 9, en su composición según categoría para la comuna de Curanilahue.

**Tabla 9. Equivalencia entre las categorías i de la metodología y las categorías entregadas por el INE.**

<b>Categoría i</b>	<b>Categoría INE</b>	<b>Cantidad</b>
Particulares	"Automovil y Station wagon"	3224
Comerciales	"Jeep", "Furgon", "Minibus", "Camioneta", "Minibus, furgos escolar y trabajadores" y "Minibus, transporte colectivo"	3172
Motos	"Motocicleta y similares"	204
Bus	"Bus articulado", "Bus, transporte colectivo" y "Bus, transporte escolar y trabajadores"	50
Camion Liviano-Mediano	"Camion simple"	384
Camion Pesado	"Tracto-camion"	277
Taxi - Taxi colectivo	" Taxi basico", "Taxi colectivo" y "Taxi turismo"	237

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2017)

- Kilómetros recorridos y velocidad promedio

La comuna de Curanilahue tiene un parque vehicular en el año 2017 de 7548 vehículos, se le asignaron los valores de kilómetros recorridos y velocidad promedio correspondiente a ciudades con parque vehicular menor a 25000 vehículos. En Tabla 10 se pueden ver los valores asignados para ciudades sin red de modelada.

**Tabla 10. Valores de kilómetros promedio y velocidad promedio para cada tipo de vehículo, en ciudades con parque vehicular menor a 25000.**

Tamaño del parque de la ciudad: "p"	Tipo Vehículo: "i"	Kilómetros/Vehículo	Velocidad Promedio
<= 25.000	Bus	30212	20
<= 25.000	Camión liviano - Mediano	3789	31
<= 25.000	Camión Pesado	24445	35
<= 25.000	Comerciales	7990	36
<= 25.000	Motos	1796	35
<= 25.000	Particulares	5592	35
<= 25.000	taxi - taxi colectivo	31677	27

Fuente: RETC (2009)

### 3.2.4 Estimación Emisiones del Sector Residencial

- Metodología de cálculo de emisiones

Se estimaron las emisiones del sector residencial según la siguiente ecuación.

$$E_c = FE_c * NA_c$$

Donde,

**E<sub>c</sub>**: Emisiones del contaminante "c" [Ton/año]

**FE<sub>c</sub>**: Factor de emisión del contaminante "c", en función del tipo de combustible [Ton/Kg].

**NA<sub>c</sub>**: Nivel de actividad para el contaminante "c", definido por el consumo anual de combustible [Kg/año].

- Nivel de actividad

Los consumos de GLP, Kerosene y Leña se obtuvieron del estudio Costo-beneficio de Implementar una Red de Gas Natural en Ciudades con Consumo

Intensivo de Leña (Universidad de Concepción, 2016). Para obtener el consumo anual de combustible se utilizó la siguiente formula:

$$NA \left( \frac{kg}{año} \right) = N^{\circ} \text{ de viviendas} * \% \text{ de Penetracion del combustible} \\ * \text{Consumo por hogar} \left( \frac{kg}{año} \right)$$

En Tabla 11 se pueden observar los consumos de GLP, Kerosene y Leña para la comuna de Curanilahue, los 2 primeros combustibles están expresados en consumo total comunal por año, en cambio el consumo de leña, esta expresado en cantidad promedio que consume cada hogar.

**Tabla 11. Consumos de combustibles en Curanilahue.**

Consumo total GLP(ton/año)	2.649
Consumo total Kerosene (m <sup>3</sup> /año)	198
Consumo Leña (kg/año-hogar)	2.924

Fuente: Universidad de Concepción, 2016

El número de viviendas totales en Curanilahue es 10570 hogares y la penetración de la leña es 92% según la encuesta CASEN (2015).

- Factores de emisión

A continuación, se detallan los FE utilizados para GLP, Kerosene y Leña, en el caso del FE de la leña, este se debe ponderar según el tipo de artefacto utilizado y la humedad de la leña. Estos datos no tienen disponibilidad para la comuna de Curanilahue, por este motivo se utilizaron los de la comuna de Coronel, contenidos en el informe Impacto del Uso de la Leña a Nivel Residencial en la Calidad del Aire de Coronel (Universidad de Concepción, 2016), bajo el supuesto de que la comuna de Curanilahue tuviese la misma distribución de artefactos y humedad.

**Tabla 12. Factores de emisión para GLP**

<b>Factor de emisión</b>	<b>MP<sub>10</sub></b>	<b>MP<sub>2.5</sub></b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>SO<sub>x</sub></b>
GLP (kg/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	33,6	0,0	222,0	1092,0	1,7

Fuente: CARB (1993)

**Tabla 13. Factores de emisión para Kerosene**

<b>Factor de emisión</b>	<b>MP<sub>10</sub></b>	<b>MP<sub>2.5</sub></b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>SO<sub>x</sub></b>
Kerosene (kg/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	127,0	97,6	588,0	2116,8	5009,8

Fuente: EPA (1998)

**Tabla 14. Factores de emisión para Leña Seca (g/kg).**

<b>Tipo de Artefacto</b>	<b>MP10</b>	<b>MP2.5</b>	<b>CO</b>	<b>NOX</b>	<b>SOX</b>
Cocina a leña	7,5	7	305,4	2,1	0,2
Combustión lenta S/T	6,2	5,8	207,1	2	0,1
Combustión lenta C/T	5,2	4,9	129,1	1,9	0,1
Salamandra	12,7	11,8	309,9	7,7	0,2
Chimenea y otras	10,1	9,2	126,3	1,3	0,2
Calefactor certificado	2,5	2,3	90	1,9	0,1
Nueva tecnología	2,1	2	10	1,9	0,1
Calefactor a pellet	1,9	1,8	10	1,9	0,1

Fuente: SICAM, 2013

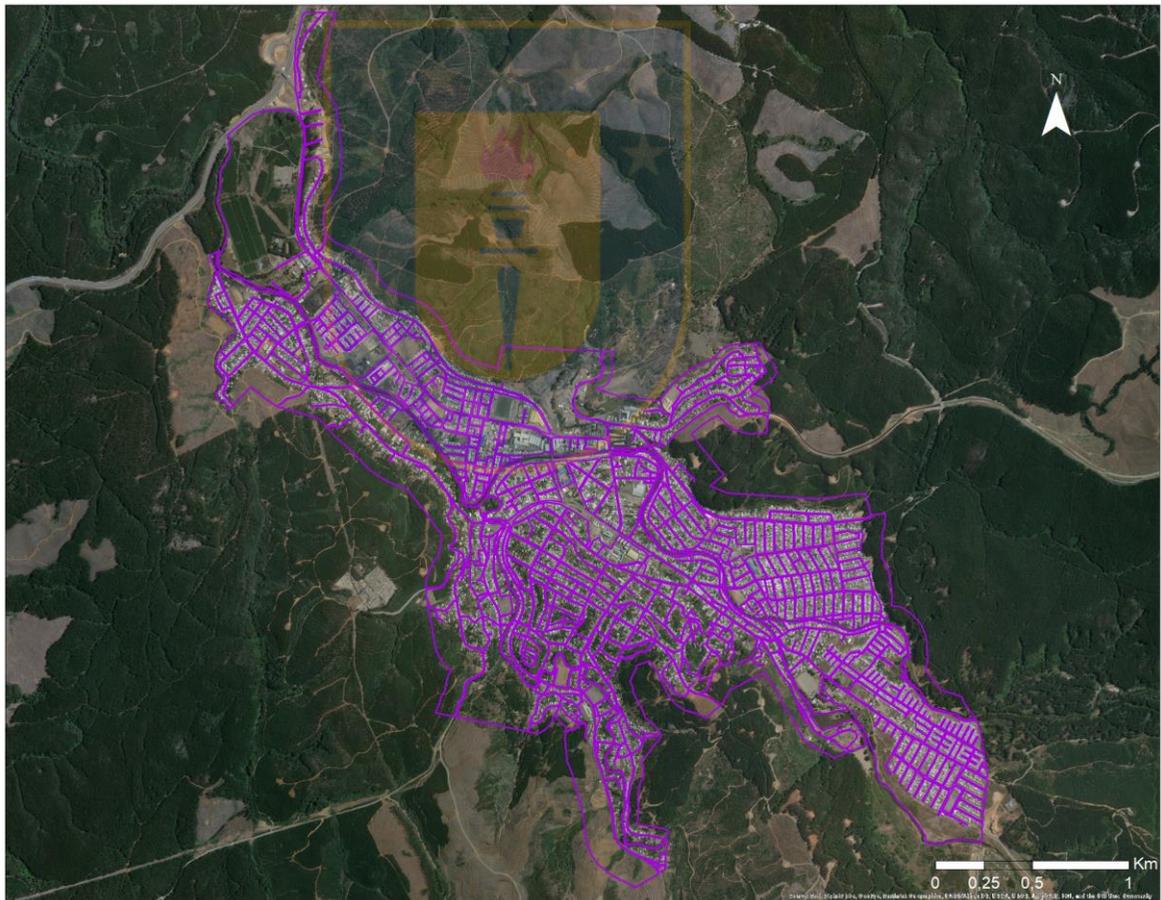
**Tabla 15. Factores de emisión para Leña Húmeda (g/kg).**

<b>Tipo de Artefacto</b>	<b>MP10</b>	<b>MP2.5</b>	<b>CO</b>	<b>NOX</b>	<b>SO2</b>
Cocina a leña	13,9	13,0	444,7	2,7	0,2
Combustión lenta S/T	11,8	11,0	443,1	3,0	0,0
Combustión lenta C/T	11,0	10,2	238,5	2,0	0,0
Salamandra	28,5	34,1	464,1	3,1	0,2
Chimenea y otras	28,5	26,6	401,0	1,3	0,2
Calefactor certificado	11,0	10,2	238,5	2,0	0,0
Nueva tecnología	5,5	5,1	71,6	2,0	0,0
Calefactor a pellet	-	-	-	-	-

Fuente: SICAM, 2013

- Distribución espacial de las emisiones residenciales de MP<sub>2.5</sub>

En figura 8 se observa la distribución espacial de los hogares en la zona urbana de Curanilahue, cada polígono lleva asociado un número de viviendas y área. La distribución de las emisiones atmosféricas (kg/m<sup>2</sup>-año) dentro de la ciudad de Curanilahue por concepto de calefacción residencial se distribuyeron en función de la densidad de viviendas, penetración de leña en los hogares y consumo promedio de leña en el hogar.



**Figura 8. Distribución de las fuentes de combustión residencial en la zona urbana.**

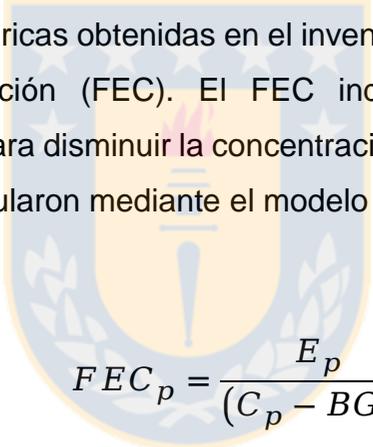
Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

### 3.3 Medidas de gestión tendientes a mejorar la calidad del aire

Para estimar el cambio en la concentración ambiental de MP<sub>2.5</sub> respecto a la emisión que es necesario para bajar los niveles de este contaminante en el aire y así cumplir lo establecido en la norma primaria de calidad de aire.

#### 3.3.1 Estimación de la reducción en la concentración ambiental de MP<sub>2.5</sub>.

Para estimar el cambio en la concentración ambiental de MP<sub>2.5</sub>, con respecto a sus emisiones atmosféricas obtenidas en el inventario, se debe calcular el factor de emisión-concentración (FEC). El FEC indica las toneladas de MP<sub>2.5</sub> necesarias a reducir para disminuir la concentración ambiental en 1 µg/m<sup>3</sup>N. Los FEC utilizados se calcularon mediante el modelo de *roll-back* simplificado.


$$FEC_p = \frac{E_p}{(C_p - BG_p)}$$

Donde,

FEC<sub>p</sub>: Factor de emisión concentración para el contaminante p [(ton/año) / (µg/m<sup>3</sup>N)]

E<sub>p</sub>: Concentración ambiental del contaminante p [µg/m<sup>3</sup>N]

C<sub>p</sub>: Emisión del contaminante p [ton/año]

BG<sub>p</sub>: Concentración *background* del contaminante p [µg/m<sup>3</sup>N]

Una vez estimado el FEC, se calculó el cambio en la emisión de MP<sub>2.5</sub> necesario para cumplir la norma primaria de calidad de aire, según la siguiente multiplicación.

$$\Delta E_{MP2.5} = FEC_{MP2.5} * \Delta C_{MP2.5}$$

Cabe destacar que estas estimaciones tienen validez bajo los siguientes supuestos:

- Las emisiones de contaminantes calculadas en el inventario, correspondan al total de emisiones de la comuna de Curanilahue.
- Solo las emisiones atmosféricas estimadas en el inventario más la concentración *background* aportan a la concentración medida por la estación de monitoreo.
- Se considera solo la emisión directa de MP<sub>2.5</sub> y no la formación secundaria de este mediante sus precursores.

Para la concentración *background* de MP<sub>2.5</sub>, al no contar con este dato para la comuna de Curanilahue, se utilizó la concentración de 4,7 µg/m<sup>3</sup>N, el cual corresponde al *background* promedio de las comunas afectas al PDA de Concepción Metropolitano (MMA, 2017).

### 3.3.2 Propuesta reducciones de emisiones y concentración P98 de MP<sub>2.5</sub>

Para lograr las metas de reducción estimadas con el factor de emisión - concentración (FEC), se evaluaron las siguientes medidas orientadas a reducir las emisiones generadas por el uso de la leña en el sector residencial.

**Tabla 16. Medidas propuestas para lograr meta de reducción de emisiones.**

<b>Medida</b>	<b>Cantidad recambio</b>	<b>%Equipos nuevos</b>
Recambio C. Certificados* (Leña seca)	8750	90%
Recambio C. Certificados* (Humedad Actual)	8750	90%
Recambio C.Pellet	7780	80%

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Estimación de los costos de reemplazar calefactores a leña

En Tabla 16 se detallan los costos asociados al recambio de calefactores a leña certificados y calefactores a pellet, se consideraron calefactores de 9 kW de potencia, los cuales se encuentran en el promedio de potencia (entre 7 y 11 kW) y declaran tener un rango de calefacción de hasta 173 m<sup>2</sup>.

**Tabla 17. Costos calefactores a leña certificados y calefactores a pellet sin I.V.A.**

<b>Tipo Calefactor</b>	<b>Modelo Equipo</b>	<b>Potencia</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio kit + instalación</b>	<b>Cantidad Hogares</b>
Certificado	Amesti Nordic 380	9 kW	\$ 222.669	\$ 121.500	8752
Pellet	Bosca Hera+	9 kW	\$ 607.492	\$ 121.500	7780

Fuente: Elaboración propia

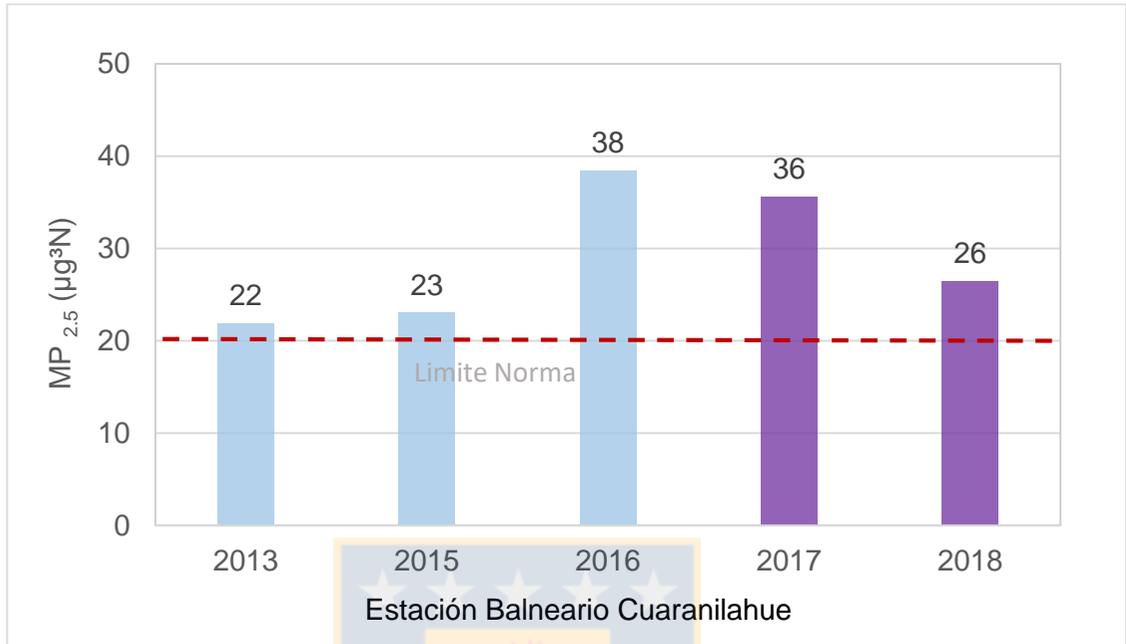
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Diagnóstico calidad del aire

El material particulado en su fracción respirable ( $MP_{10}$ ) y fina ( $MP_{2.5}$ ) es el contaminante más crítico en la región del Biobío y prácticamente todo el centro-sur de Chile (MMA, 2016). Además, según la disponibilidad de datos de la estación de monitoreo de Curanilahue, los cuales solo están en línea para material particulado fino  $MP_{2.5}$ . Por este motivo el análisis del cumplimiento normativo se centra en los niveles ambientales de material particulado fino  $MP_{2.5}$ .

En la figura 9, se muestran los promedios anuales de  $MP_{2.5}$  para los años 2013 a 2018, exceptuando el año 2014 el cual no fue considerado, ya que no cumple con el mínimo del 75% de los meses con datos medidos. En cuanto al promedio tri-anual, da como resultante  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  para los años 2016, 2017 y 2018. Como medida comparativa se muestra el límite normativo ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) establecido en el D.S N°12/2011 del Ministerio del Medio Ambiente. Se puede observar que para todos los años se supera el límite, siendo el año 2016 el de mayor concentración de material particulado fino ( $MP_{2.5}$ ).

En la figura 10 se muestra el percentil 98 de los promedios diarios, los cuales también arrojan valores sobre la norma diaria ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) para todos los años con registros de concentración ambiental de  $MP_{2.5}$ .



**Figura 3. Promedio de la concentración anual de MP<sub>2,5</sub> en la estación de monitoreo de calidad de aire balneario Cuaranilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA

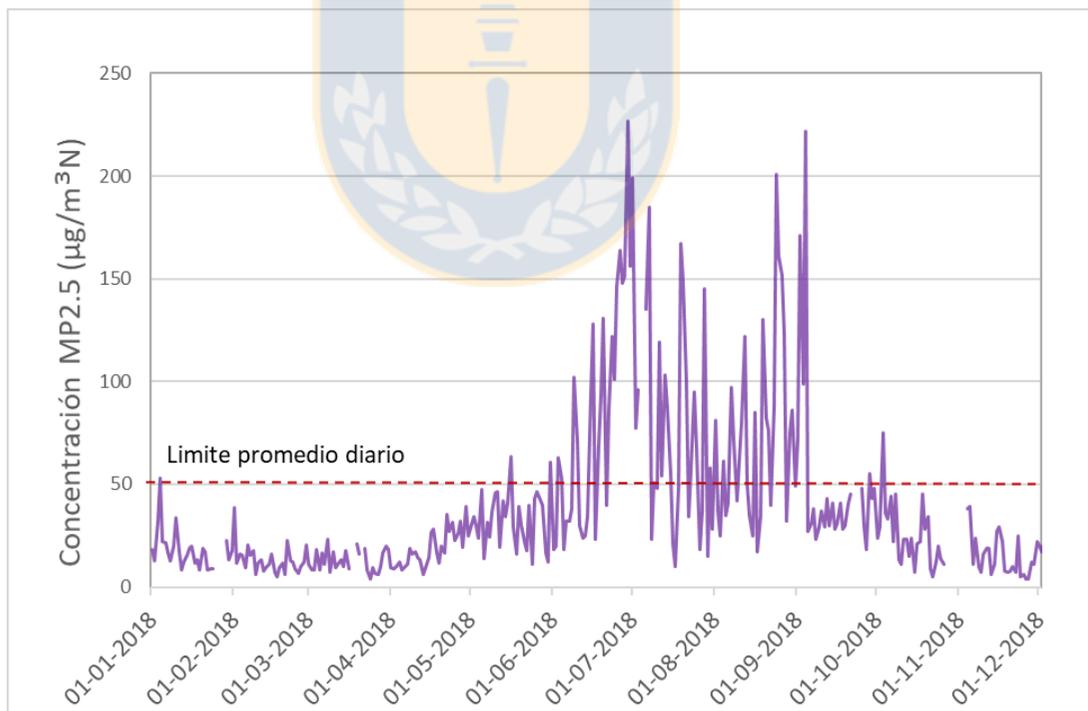


**Figura 4. Percentil 98 de la concentración diaria de MP<sub>2,5</sub> en la estación de monitoreo de calidad de aire balneario Cuaranilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA

Cabe destacar que para los años 2017 y 2018 se usaron datos validados según el D.S N°61/2008 del Ministerio de Salud, por el contrario, los años 2013, 2015 y 2016 corresponden solo a valores referencia, ya que las mediciones diarias (24 horas) no contaban con registro horario, requisito que está estipulado en el decreto supremo antes mencionado y que es necesario para validar los datos y poder tomarlos en cuenta para futuras declaraciones de zona saturada.

En figura 11 se muestra la evolución anual de los promedios diarios de MP<sub>2.5</sub> para el año 2018, el cual tiene un 100% de registros validados (medidos) según el D.S N°61/2008 del Ministerio de Salud. Se puede observar que las concentraciones diarias de MP<sub>2.5</sub> aumentan radicalmente entre los meses de junio y septiembre, que son los meses más fríos donde se intensifica el uso de leña para calefacción residencial.



**Figura 11. Evolución de las concentraciones diarias de MP<sub>2.5</sub> en la estación Balneario Curanilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINCA

## 4.2 Inventario de Emisiones Atmosféricas en la Comuna de Curanilahue

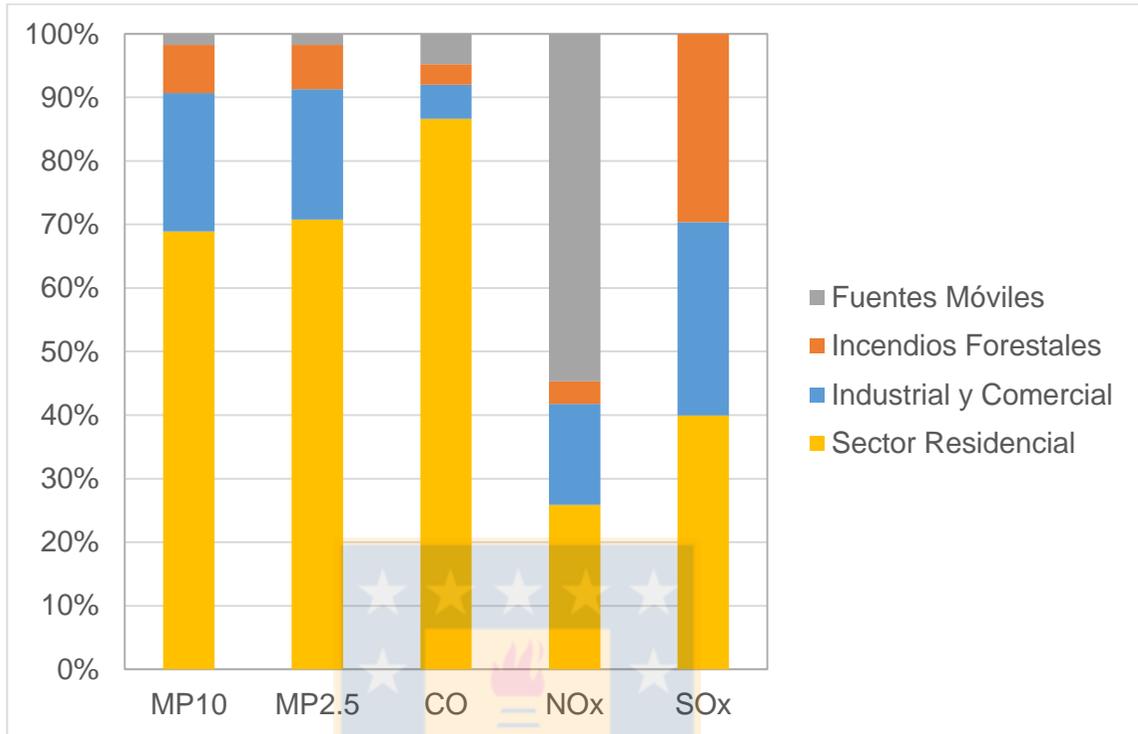
Se estimaron las emisiones atmosféricas anuales de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. En Tabla 18 se presenta un resumen de las principales fuentes y su contribución al total de emisiones.

**Tabla 18. Resumen de emisiones atmosféricas en la comuna de Curanilahue, según tipo de fuente.**

Tipo de fuente	Emisiones según contaminante (Ton/año)				
	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2.5</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Sector Residencial	274,9	260,4	7856,0	73,0	4,1
Industrial y Comercial	87,0	75,5	487,3	44,8	3,1
Incendios Forestales	30,2	25,6	293,6	10,0	3,1
Fuentes Móviles	7,0	6,4	432,2	154,2	0,0
<b>Total</b>	<b>399,0</b>	<b>367,9</b>	<b>9069,2</b>	<b>282,0</b>	<b>10,3</b>

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede ver en Figura 12, al comparar los tipos de fuentes podemos afirmar que el sector residencial es la principal fuente generadora de MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>10</sub>, con un 71% del aporte de MP<sub>2.5</sub> y un 69% del aporte de MP<sub>10</sub>. Le sigue el sector industrial, el cual tiene un aporte del 20% para MP<sub>2.5</sub> y 22% para MP<sub>10</sub>. Con estos datos, se verifica que el alto consumo de leña en los hogares es el principal responsable de las altas tasas de emisiones de MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>10</sub>.



**Figura 12. Aporte de cada fuente al total de las emisiones.**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1 Detalle de las principales fuentes de MP<sub>2.5</sub> en la comuna de Curanilahue.

Para un mejor entendimiento del origen de las emisiones atmosféricas, se analizaron en detalle las fuentes para cada sector, para así poder orientar de mejor manera las medidas de gestión. Se consideraron solo el sector industrial, sector residencial e incendios forestales, las fuentes móviles no se detallan ya que representan un aporte de solo el 2% de MP<sub>2.5</sub> al inventario de emisiones. Cabe destacar que las fuentes móviles son las que mayor aporte tienen a las emisiones de NO<sub>x</sub>, al generarse este principalmente por la combustión de hidrocarburos, además este compuesto es un precursor de O<sub>3</sub> y MP<sub>2.5</sub>.

- Sector Industrial y Comercial

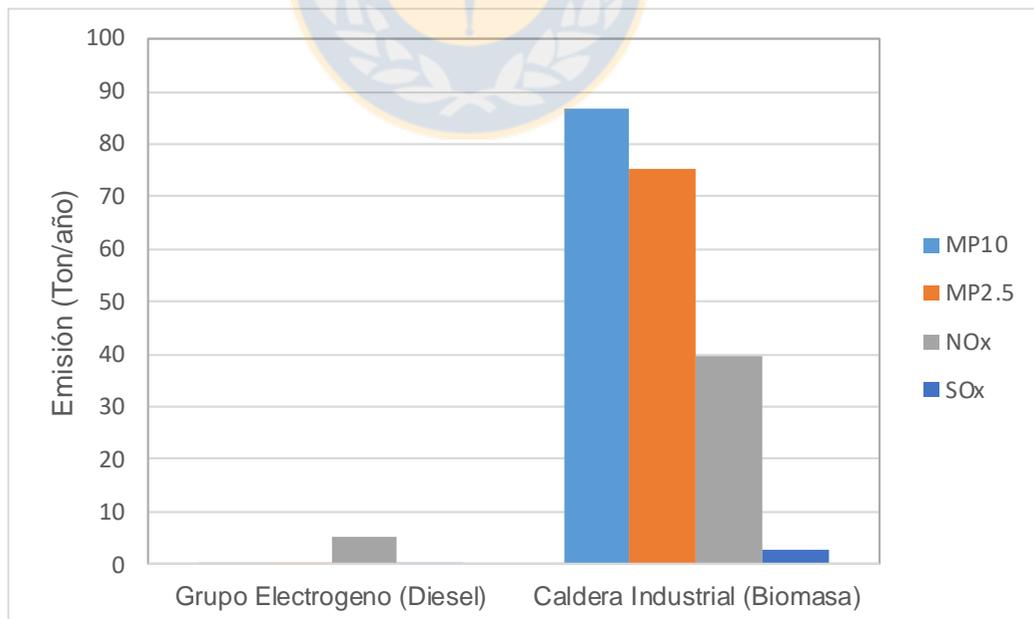
En Tabla 19 se puede ver el detalle de las emisiones del sector industrial y residencial según su origen.

**Tabla 19. Emisiones sector industrial y comercial según fuente de emisión.**

Fuente	MP10	MP2.5	NOx	CO	SOx
Grupo Electrogeno (Diesel)	0,18	0,04	5,24	1,13	0,28
Caldera Industrial (Biomasa)	86,79	75,47	39,53	486,20	2,86
Total	86,97	75,51	44,77	487,34	3,14

Fuente: Elaboración propia

En este sector, según Figura 13, el MP<sub>2.5</sub> en más de un 99% por calderas industriales a vapor, que utilizan biomasa de desechos forestales como combustible.

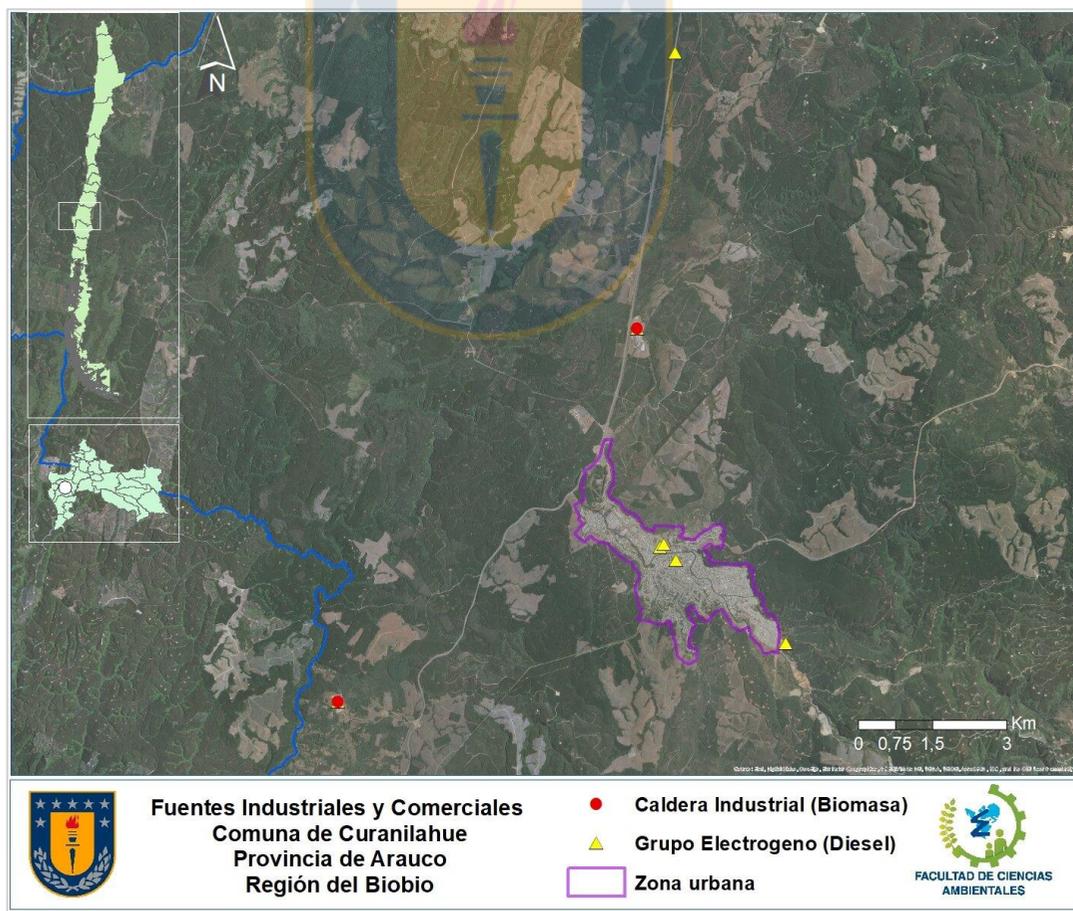


**Figura 13. Emisiones sector industrial según fuentes generadoras.**

Fuente: Elaboración propia

Las emisiones por Calderas Industriales provienen específicamente de 2 fuentes ilustradas en Figura 14, dichas industrias son del tipo Aserraderos y Manufactura de Maderas, estas industrias se dedican a la elaboración de los distintos tipos de maderas, donde los desechos de biomasa producidos son utilizados como combustible. Este tipo de industrias a pesar de ser solo 2 unidades (puntos rojos), presentan altas emisiones especialmente de  $MP_{2.5}$ , contribuyendo con el 20% del total de las emisiones de este contaminante.

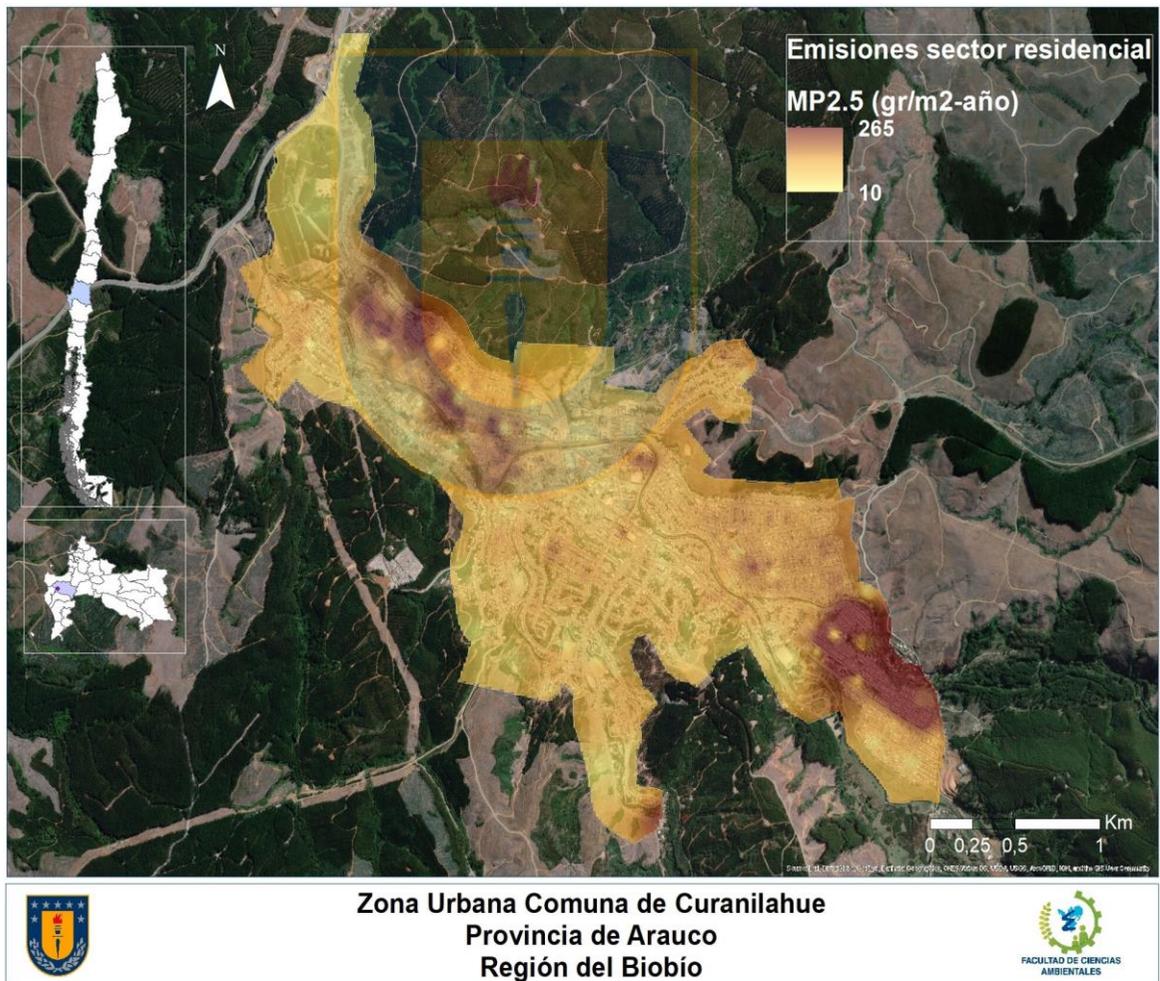
Es importante mencionar que las calderas anteriormente descritas, se emplazan alejadas de la zona urbana de la comuna de Curanilahue. Por lo tanto, no tienen un impacto directo hacia la población, ya que su impacto sobre la zona urbana va a depender de variables meteorológicas (dirección y velocidad del viento).



**Figura 14. Ubicación geográfica de las fuentes industriales y comerciales.**  
Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

- Emisiones sector residencial

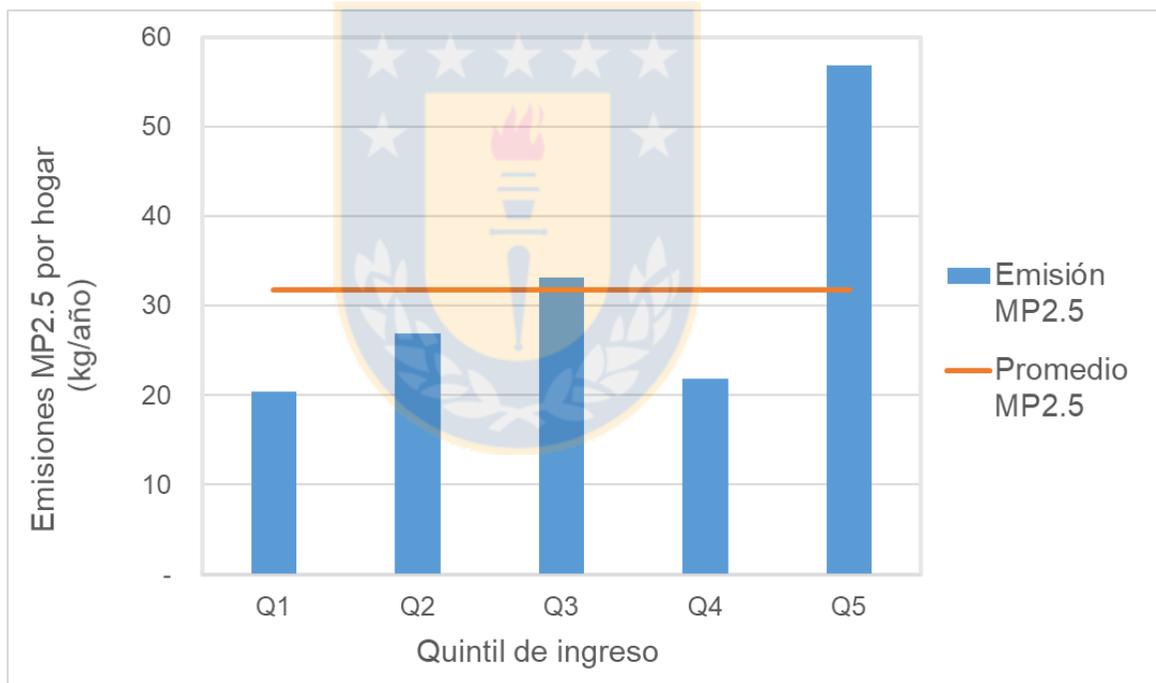
Las emisiones del contaminante  $MP_{2.5}$  en sector residencial provienen en un 99,9% de la quema de leña para calefacción, en Figura 15, se puede observar la distribución de las emisiones de  $MP_{2.5}$  en la zona urbana, la cual concentra a 10278 hogares, lo que corresponde al 97% del total comunal. La zona sureste y noroeste de la ciudad, son las que concentran mayores emisiones por  $m^2$ , ya que son barrios totalmente residenciales y presentan una mayor densidad de hogares por hectárea.



**Figura 15. Distribución emisiones de  $MP_{2.5}$  en la zona urbana de Curanilahue.**

Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

Se estima que los hogares de Curanilahue emiten un promedio de 32 kg/año de MP<sub>2.5</sub>. Al analizar los resultados en Figura 16, se puede observar que las emisiones en el 5to quintil, son prácticamente el triple que el quintil más bajo, existiendo una diferencia de 37 toneladas/año entre ambos. El 5to quintil, al ser el de mayores recursos económicos, es el que mayor cantidad de leña utiliza (6.355 kg/hogar-año) en comparación al promedio (2.924 kg/hogar-año). El promedio de emisiones se sitúa en torno a las 32 ton/año, siendo el quintil 3 y quintil 2 los más cercanos a este.



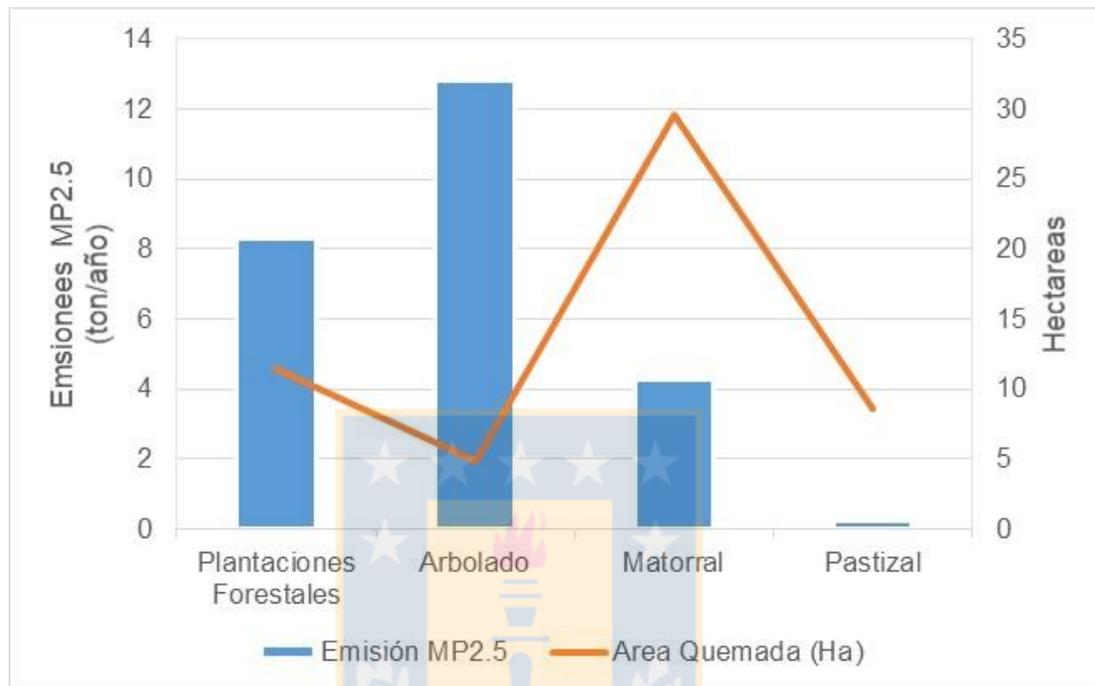
**Figura 16. Emisiones de MP<sub>2.5</sub> por quintil de ingreso.**

Fuente: Elaboración propia

- Emisiones de MP<sub>2.5</sub> por incendios forestales

Las emisiones de MP<sub>2.5</sub> por incendios forestales son 25,6 (Ton/año), lo que corresponde al 7% respecto al total del inventario. Estas emisiones se distribuyen según Figura 17, donde se observa que el arbolado (vegetación natural) es el

que en menos superficie se combustiono, pero debido a su alta densidad (ton/ha), es el que más apporto a las emisiones de MP<sub>2.5</sub>.



**Figura 17. Emisiones de MP<sub>2.5</sub> por incendios forestales, según tipo de superficie quemada.**

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Medidas gestión tendientes a mejorar las condiciones actuales de la calidad del aire

Como resultado del inventario de emisiones atmosféricas se obtuvo que el sector residencial es el que mayor aporte tiene en las emisiones de MP<sub>2.5</sub> con 261 Ton/año, lo que corresponde a un 71% respecto del total, dichas emisiones son generadas en un 99% por la combustión de leña para calefacción. Para el sector industrial y comercial, las emisiones corresponden a un 20% del total de los cuales el 99% provienen de calderas industriales con biomasa como combustible. Por estos resultados, las fuentes a reducir son la combustión a leña en el sector residencial y las calderas a biomasa en el sector industrial.

#### 4.3.1 Reducción en la concentración ambiental de MP<sub>2.5</sub>

En Tabla 20 se expone el cambio en las emisiones atmosféricas de MP<sub>2.5</sub> necesario para cumplir norma primaria de calidad de aire. El cambio estimado al año 2029, corresponde a las emisiones y su equivalente en concentración ambiental, que se necesitan disminuir, para lograr las metas de reducción propuestas. En este caso se proyecta como objetivo al año 2029, disminuir la concentración ambiental hasta cumplir los límites normativos, para el tri-anual, se proyecta una concentración de 19 µg/m<sup>3</sup>N y para el P98 se propone reducir hasta 49 µg/m<sup>3</sup>N.

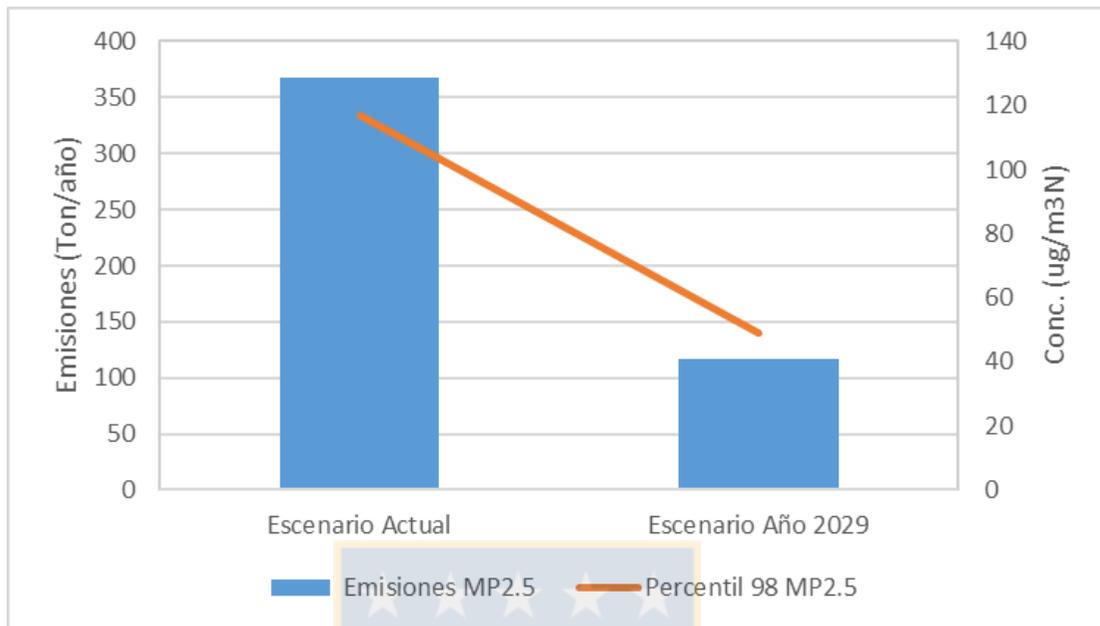
Para el cumplimiento de la concentración límite Tri-anual se estima que sería necesaria una reducción de las emisiones de MP<sub>2.5</sub> en un 49%, en cuanto al límite para la concentración P98, sería necesario una reducción del 60% de las emisiones.

**Tabla 20. Metas de reducción de emisiones y concentraciones en un plazo de 10 años respecto al escenario actual.**

Norma primaria MP <sub>2.5</sub>	Escenario Actual		Δ Estimado al año 2029		Escenario Año 2029		Reducción
	Emisiones [ton/año]	Conc. [ug/m3]	Δ Emisiones [ton/año]	Δ Conc. [ug/m3]	Emisiones [ton/año]	Conc. [ug/m3]	Emisiones [ton/año]
Tri-Anual	368	33	182	14	186	19	49%
P98		117	223	68	145	49	60%

Fuente: elaboración propia

Con la finalidad de aplicar un principio precautorio, se proponen medidas tendientes a cumplir el límite de concentración para el P98, ya que, al requerir una mayor reducción en las emisiones, se estarían cumpliendo ambos límites normativos.



**Figura 18. Reducción en las emisiones y percentil 98 de MP<sub>2.5</sub>**

Fuente: Elaboración propia

En Figura 18 se puede observar la disminución de emisiones y concentración ambiental si se cumpliera la meta de reducción para emisiones de MP<sub>2.5</sub>, propuesta en un horizonte de 10 años.

#### 4.3.2 Propuesta reducciones de emisiones y concentración P98 de MP<sub>2.5</sub>

Para cumplir con la reducción de emisiones atmosféricas de MP<sub>2.5</sub> del 60%, se proponen cuotas de reducción para las principales fuentes emisoras de material particulado fino. En Tabla 21 se presentan las emisiones de MP<sub>2.5</sub> del escenario actual asociadas a sector residencial y sector industrial, así como las reducciones derivadas de la implementación de la implementación de las medidas del plan.

**Tabla 21. Metas de reducción de emisiones de MP<sub>2.5</sub> propuesta a sector residencial e industrial.**

<b>Sector</b>	<b>Escenario actual [ton/año]</b>	<b>Escenario año 2029 [ton/año]</b>	<b>Reducción respecto a la Fuente</b>	<b>Reducción respecto al total</b>
Residencial	260	75	71%	50%
Industrial	76	38	50%	10%

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan las medidas propuestas para lograr las metas de reducción.

- Reducciones sector industrial

El sector industrial lograría reducir un 50% de sus emisiones, contribuyendo con un 10% respecto al total, para lograr este objetivo se propone aplicar límites máximos de emisión de material particulado según Tabla 22, la cual fue propuesta en el Anteproyecto de la Norma de Emisión para Calderas (MMA, 2017). Para el caso de las calderas a vapor, ubicada en la comuna de Curanilahue, estas se encuentran en el rango de entre 3 MW y 20 MW de potencia térmica, para lo cual se establece un límite de 50 mg/Nm<sup>3</sup>.

**Tabla 22. Límite máximo de emisión de MP para calderas existentes.**

Potencia térmica	Estado del combustible	Material Particulado (mg/m <sup>3</sup> N)
≥ 1 MWt y < 3 MWt	Gaseoso	n.a
	Líquido	50
	Sólido	75
≥ 3 MWt y < 20 MWt	Gaseoso	n.a
	Líquido	50
	Sólido	50
≥ 20 MWt	Gaseoso	n.a
	Líquido	50
	Sólido	30

Fuente: MMA, 2017

De acuerdo al informe técnico que respalda el anteproyecto de Norma de emisión para Calderas, las reducciones después de implementar los límites estarían en el orden de 50% a 90% de las emisiones de MP, dependiendo de las medidas tecnológicas o de gestión a implementar por las industrias para lograr el cumplimiento. Por este motivo se cuantifica la reducción del sector industrial en 50%, que es la reducción mínima que se estima estas tendrían.

Por otro lado, existe el D.S 29/2013 del MINSEGPRES, que establece, para todo el territorio nacional, la norma de emisión para las instalaciones de incineración y coincineración que correspondan a hornos de cemento, hornos rotatorios de cal e instalaciones forestales que utilicen biomasa forestal tratada. En el caso de las calderas a vapor instaladas en la comuna cumplieren lo dispuesto en el decreto, se establece un límite de emisión para coincineración en instalaciones forestales de 50 mg/Nm<sup>3</sup>.

- Reducciones sector residencial

Para lograr la meta de reducción de emisiones MP<sub>2.5</sub> de sector residencial se debe reducir de 260 ton/año a 75 ton/año. Para lograr esta reducción se proponen recambios de calefactores certificados según el D.S N°39/2011 del MMA y recambios a calefactores a Pellet. En Tabla 23 se exponen las medidas anteriormente descritas y el número de equipos necesario de ser reemplazados para lograr la meta de reducciones de emisiones de MP<sub>2.5</sub>.

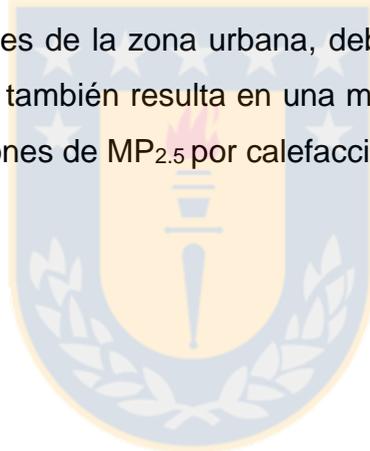
**Tabla 23. Medidas propuestas para lograr reducción de emisión en el sector residencial.**

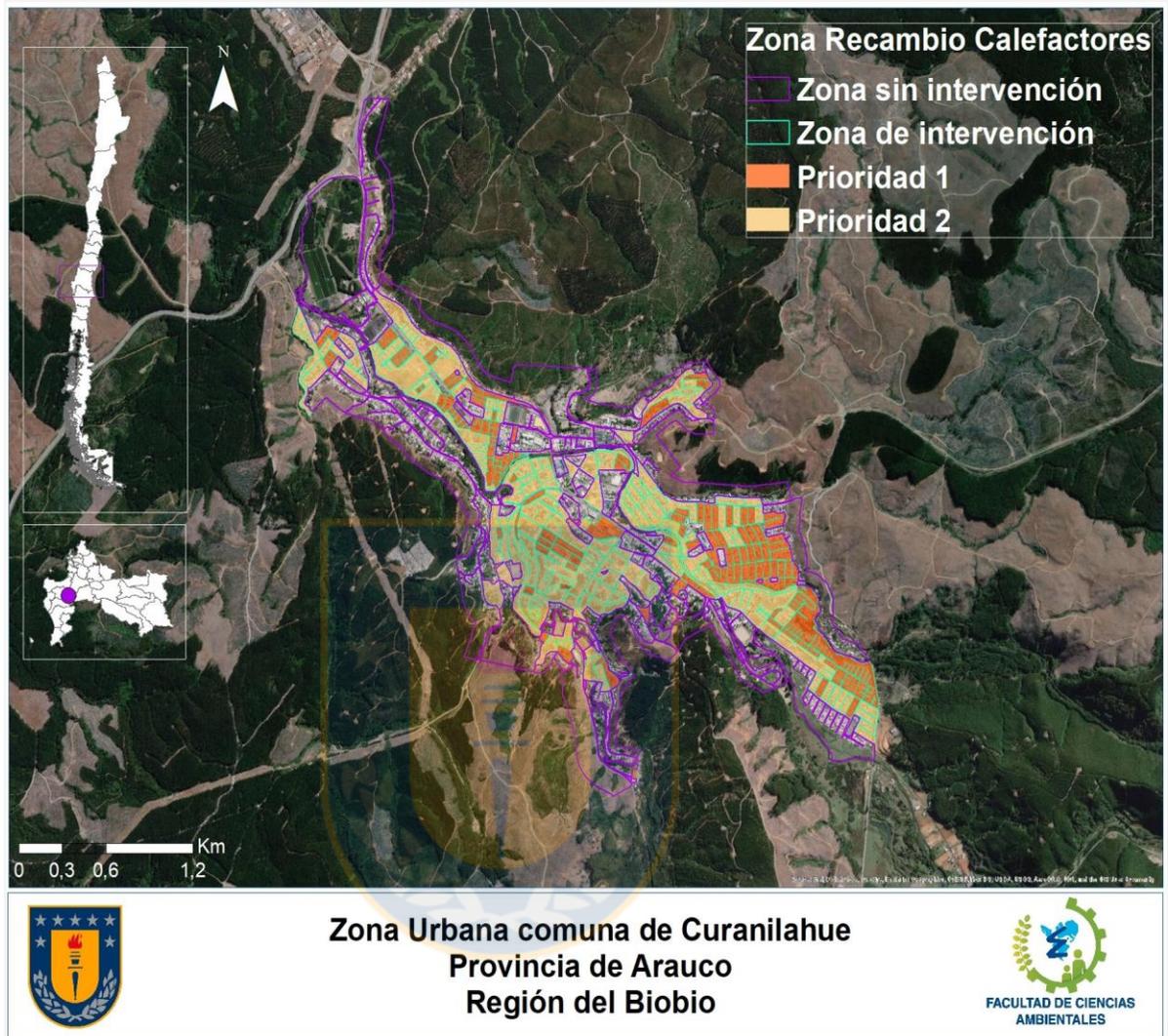
Medida	Cantidad hogares recambio	Porcentaje de equipos nuevos	Emisiones MP <sub>2.5</sub> con recambio(ton/año)
Recambio C. Certificados (Leña seca)	8750	90%	75
Recambio C. Certificados (Humedad Actual)	8750	90%	181
Recambio C. Pellet	7780	80%	75

Fuente: Elaboración propia

Para cumplir con el escenario propuesto al año 2029, se necesita reemplazar el 90% de calefactores certificados y 80% en el caso de calefactores a pellet. La reducción de emisiones estimada se cumple solo en el caso que estos reemplazos sean utilizando el 100% de leña seca, para el caso del pellet esta condición siempre se cumple al ser un combustible que no tiene problemas de humedad. Por lo tanto, es importante destacar que el nivel de reducción con recambio de calefactores a leña, depende exclusivamente de la utilización del artefacto y la humedad de la leña, lo que es son factores prácticamente imposibles de poder fiscalizar, por lo tanto, la opción más viable es la de los calefactores a pellet.

En Figura 19 se muestra la zona propuesta para recambio de calefactores, correspondiente a la zona de intervención, que es la que presentó mayores emisiones de  $MP_{2.5}$  ( $gr/m^2$ -año). La zona de intervención, tiene 2 órdenes de prioridad, siendo la de color naranja las zonas extremadamente contaminantes, ya que tienen una alta densidad de viviendas por hectárea, lo que causa que las emisiones por calefacción residencial se concentren en ese sector. La zona de prioridad 2, considera las zonas con emisiones intermedias y la zona sin intervención, corresponde a las con bajas emisiones. Las zonas con bajas emisiones corresponden a los sectores céntricos, los cuales agrupan sectores comerciales, los cuales tienen menor densidad de viviendas. También hay bajas emisiones en los bordes de la zona urbana, debido a que hay propiedades de mayor tamaño, lo que también resulta en una menor densidad de hogares, por lo tanto, menos emisiones de  $MP_{2.5}$  por calefacción residencial.

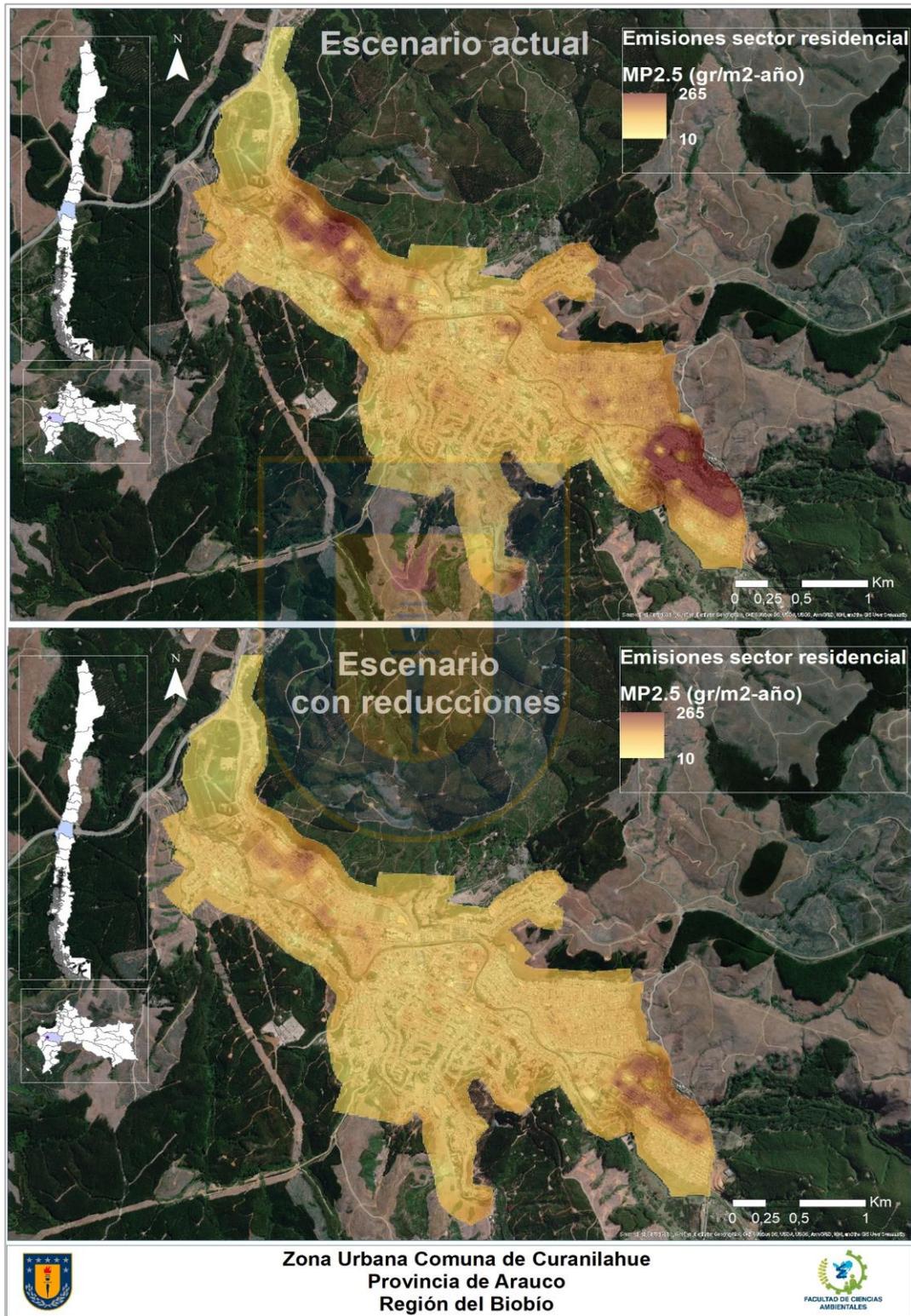




**Figura 19. Zona de intervención propuesta para recambio de calefactores**

Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

Después de aplicar la reducción en las emisiones de  $MP_{2.5}$ , se espera tener una incidencia sobre la zona de intervención. En Figura 20 se puede observar una comparación entre el estado actual de las emisiones de  $MP_{2.5}$  en la zona urbana, versus el escenario propuesto al año 2029, con medidas de gestión para el sector residencial ya aplicadas. Se puede observar una fuente disminución, especialmente en las zonas con mayores emisiones.



**Figura 20. Nivel de emisiones MP<sub>2.5</sub> actual vs emisiones con intervención.**  
Fuente: Elaboración propia en base a metadatos del INE (2017)

#### 4.3.3 Costos de recambio de calefactores a leña

En Tabla 24 se pueden ver los costos por tonelada reducida para aplicar las medidas de gestión al sector residencial, los cuales ascienden a 13,5 (MM\$/Ton) y 25,4 (MM\$/Ton) para calefactores certificados (leña) y calefactores a pellet respectivamente. Si bien el costo es significativamente menor para la medida de recambios con calefactores certificados, esta medida no asegura el cumplimiento de la meta de reducción, ya que esta solo se logra en el caso que estos calefactores sean utilizados de manera correcta y con leña seca.

Por otro lado, el recambio con calefactores a pellet tiene un costo 88% más alto, pero, nos asegura el cumplimiento de la meta de reducción, ya que el pellet es un combustible que no presenta problemas de humedad. Resumiendo, ambas medidas tienen ventajas y desventajas, pero si se desea cumplir las metas de reducción y minimizar las posibilidades de mala utilización del artefacto, los calefactores a pellet son la opción más óptima.

**Tabla 24. Costos de realizar el recambio de calefactores.**

<b>Tipo Calefactor</b>	<b>Costo total (MM\$)</b>	<b>Costo de reducción emisiones (MM\$/Ton)</b>
Certificado	3012,2	13,5
Pellet	5671,6	25,4

(MM\$= Millones de pesos)  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4 Medidas de gestión para incendios forestales

Los incendios forestales representan solo un 7% de las emisiones totales de MP<sub>2.5</sub> en Curanilahue, pero dados los crecientes escenarios de incendios forestales en los últimos años en la zona central de Chile, se hace necesario considerar este ítem. En Tabla 25 se exponen medidas de prevención y combate del fuego, que tienen por objeto reducir en cantidad y magnitud la ocurrencia de

incendios y por consiguiente tener un efecto sobre las emisiones atmosféricas que estos producen, incluyendo también el bien superior que es resguardar la integridad de los habitantes, principalmente en las zonas rurales, las cuales están más propensas a ser afectados por los incendios forestales.

**Tabla 25. Medidas de prevención y combate del fuego en incendios forestales.**

<b>Prevención</b>	Mitigatoria	Planificación territorial	Definir áreas vulnerables a incendios forestales como zonas de riesgo
			Establecer certificados de información sobre vulnerabilidad frente a incendios en la venta de terrenos
			Fortalecer las capacidades de los gobiernos locales para fiscalizar la implementación de normativas de construcción
		Gestión del combustible	Limpieza de residuos forestales
	Instalación de cortafuegos alrededor de zonas pobladas		
	Social	Prevención social	Fortalecer mecanismos de información a nivel local, asegurando que las comunidades conozcan sus riesgos y vulnerabilidades
			Establecer mecanismos de educación en escuelas, con objeto de entregar información sobre las causas y consecuencias de los incendios forestales
			Desarrollar capacidades locales para la organización comunitaria en materia de prevención de incendios forestales
<b>Combate del fuego</b>	Abordar de ataque inicial, asegurando una respuesta temprana y contundente, para evitar la propagación.		
	Equilibrar el gasto en combate y prevención de incendios forestales, privilegiando medidas más eficientes para enfrentarlos		
	Fortalecer estrategias de evacuación, especialmente frente a grandes incendios.		

Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Políticas Públicas UC, 2018

## 5. CONCLUSIONES

El diagnóstico de la calidad del aire de la comuna de Curanilahue nos entrega resultados preocupantes, el percentil 98 de las concentraciones de MP<sub>2.5</sub> para los promedios diarios del año 2018 es 117µg/m<sup>3</sup>N, superando ampliamente a la normativa, la cual establece un máximo de 50 µg/m<sup>3</sup>N. Para promedio de concentración anual ocurre lo mismo, se obtuvo un tri-anual (2016, 2017 y 2018) de 33 µg/m<sup>3</sup>N, superando el máximo de 20 µg/m<sup>3</sup>N que establece la normativa.

En el inventario de emisiones estimado mediante factores de emisión, se comprueba que el sector residencial es el que más aporta a las emisiones de MP<sub>2.5</sub>, con 261 Ton/año, lo que corresponde a un 71% respecto del total. Las emisiones de MP<sub>2.5</sub> del sector residencial son generadas en más de un 99% por la combustión a leña para calefactores. Esto se correlaciona con las concentraciones ambientales registradas por la Estación de Monitoreo Balneario Curanilahue, la cual registra un aumento abrupto de la concentración de MP<sub>2.5</sub> en los meses de invierno (junio-septiembre) producto de las emisiones por combustión de leña para calefacción residencial. El sector industrial el segundo mayor emisor de MP<sub>2.5</sub> con un 20% del total, siendo un 99% de estas emisiones generadas por calderas de vapor con biomasa como combustible.

Se estimó que para poder alcanzar niveles de cumplimiento normativo para MP<sub>2.5</sub>, se debe reducir en un 60% las emisiones totales de MP<sub>2.5</sub>, de esta forma se lograría cumplir con los límites diarios y anuales de concentración ambiental establecidos en la normativa.

Se propone reducir emisiones atmosféricas en el sector industrial y residencial, para el primero, a través de la implementación de normas de emisión para calderas, en el caso de la comuna, se establecen límites de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, esta medida es aplicable solo en el caso que las calderas no estuviesen cumpliendo

el D.S 29/2013, el cual establece límites de emisión de 50 mg/Nm<sup>3</sup> para coincineración de residuos forestales tratados. Para el sector residencial, se proponen medidas de reducción, en las cuales se estimó en un 71% la reducción necesaria para lograr un 50% de reducción respecto al total de emisiones. Para lograr dicha reducción sin cambiar el tipo de energético, se debe reemplazar una alta cantidad de calefactores, estimándose un 80% en el caso de calefactores a pellet y un 90% en el caso de calefactores a leña certificados.

Se estimaron los costos económicos de implementar los recambios de calefactores, en el caso de calefactores certificados, los costos ascienden a \$13,5 millones por tonelada de MP<sub>2.5</sub> reducida, por otro lado, los calefactores a pellet tendrían un costo de \$25,4 millones por tonelada reducida. La opción de recambio más óptima, a pesar de tener un costo más elevado, es a calefactores a pellet, ya que la reducción no depende de la utilización del artefacto y el pellet no presenta problemas de humedad. Por el contrario, el cumplimiento de las metas de reducción con calefactores certificados a leña, se ve condicionado exclusivamente con la utilización del artefacto y la humedad de la leña, condiciones que son prácticamente imposibles de fiscalizar. Por lo tanto, se recomienda en futuros estudios, considerar solo la opción de recambios a calefactores a pellet, en desmedro de la leña.

Este informe cumplió por finalidad generar datos de calidad de aire para la comuna de Curanilahue, se espera que a futuro se pueda actualizar el inventario de emisiones realizado, además se requieren evaluar otras alternativas para solucionar el problema de calidad del aire que aqueja a la comuna de Curanilahue como, por ejemplo, el análisis costo-beneficio de introducir otros energéticos distintos a la biomasa y el análisis del mejoramiento de las condiciones térmicas de las viviendas en la comuna.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

California Air Resources Board. (2004). *Wildfire Emissions Methodology*.

California Air Resources Board. (2006). *Wildland Fire Use (WFU) Methodology*.

Centro de Políticas Públicas UC. (2018). Prevención de incendios forestales: propuestas para una mirada más efectiva e integral. *Temas de la Agenda Pública*, 13(110), 1-14.

CONAMA. (2007). Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005. Santiago.

CONAF. (2006). Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales Region del Biobio.

European Environment Agency. (2003). *Atmospheric Emission Inventory Guidebook*.

EULA-Universidad de Concepción. (2016). Diagnóstico Energético Prospectivo y Plan de Acción 2016-2020 para la Región del Biobío.

EULA. (2014). Análisis del impacto económico y ambiental del abastecimiento estable de GNL al sector industrial del Concepción Metropolitano.

EULA. (2016). Impacto del Uso de la Leña a Nivel Residencial en la Calidad del Aire de Coronel, Región del Biobío.

RETC. (2009). Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas Móviles.

IIT. (2012). Elaboración del análisis general del impacto económico y social del plan de prevención por MP<sub>2,5</sub> en el Concepción Metropolitano.

Mardones, C. & Jimenez, J. (2015). Alternatives for reducing fine particulate matter from industrial activities in Concepción Metropolitan Area, Chile. *Energy & Environment Journal* 26, 445-456.

Mardones, C., Paredes, C., Jiménez, J., Farías, O., Catalán, P. (2015). Tecnologías de control de emisiones y disponibilidad de gas natural como opciones para reducir emisiones de MP<sub>2,5</sub> en el Concepción Metropolitano. *Revista de Análisis Económico*, 30, 3-23.

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Informe del Estado del Medio Ambiente. Santiago, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente. Santiago, Chile.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. (1994). Ley 19.300: Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Santiago, Chile.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. (2009). Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) de Temuco y Padre las Casas. D.S. n° 78 de 20 de julio de 2009. Santiago, Chile.

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

Pitts, B. & Pitts, J. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. San Diego: Academic Press.

SICAM (2017). Actualización del inventario de emisiones para la zona saturada de Coyhaique.

SICAM (2015). Actualización del inventario de emisiones y modelación de contaminantes de Concepción Metropolitano, año base 2013.

Sánchez, A. (2003). Globalización, recursos naturales y gobiernos locales: El sector forestal de Chile en comuna de Curanilahue, VIII Región. *Revista de Geografía*

UDT. (2012). Antecedentes para Elaborar una Norma de Emisión para Calderas y Procesos de Combustión en el Sector Industrial, Comercial y Residencial.

Universidad del Biobío (2011). Plan de desarrollo comunal, Comuna de Curanilahue 2011-2015.

Urbanski, S. (2013). *Wildland Fire Emissions, Carbon, and Climate: Emission Factors*. *Forest Ecology and Management*. 317, 51-60.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1986). *Guideline on air quality models (Revised)*. Carolina del Norte, Estados Unidos.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *AP-42, Fifth edition, volume I, chapter 13, miscellaneous sources (2006)*.

Zaror, C. (2002). Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos. Concepción, Chile: Editorial Universidad de Concepción.

World Health Organization. (2016) . *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization.

## 7. ANEXOS

### Anexo 1. Niveles de actividad sector industrial y comercial.

**Tabla A-1. Consumos de combustible sector industrial, residencial y fiscal.**

Tipo	Razón	Descripción	Combustible	Total(Kg/AÑO)
Fiscal	BANCOESTADO	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	10,1
Comercial	RENDIC HNOS. S.A	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	120,0
Comercial	FORACTION CHILI S. A.	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	24864,0
Comercial	FORACTION CHILI S. A.	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	21889,6
Comercial	Forestal Celco S.A.	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	833,3
Industrial	SAGESA S.A	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	5054,3
Industrial	SAGESA S.A	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	6301,7
Industrial	SAGESA S.A	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	5856,5
Comercial	CONCESIONES RUTA 160 S.A.	Grupos Electrógenos	PETROLEO N° 2 (Diesel)	483,0

Fuente: D.S 138/2005 año base 2014

**Tabla A-1.2. Emisiones atmosféricas calderas industriales.**

Razón	Nombre	MP10	MP2.5	NOx	CO	SOx
FORACTION CHILI S.A.	FORACTION CHILI	47,1	39,7	0,0	111,2	0,7
ASERRADEROS ARAUCO S. A.	ASERRADEROS EL COLORADO	39,7	35,7	39,5	375,0	2,2

Fuente: RETC (2014)

En Tabla Tabla A-1.3. se pueden ver los datos ingresados mediante DIA, para el aserradero El Colorado, según la capacidad de la caldera, se estimó en base a la capacidad calorífica de la biomasa, su potencia térmica, la cual tiene una estimación de 10MW como máximo.

Para el caso del aserradero Foraction Chili, no se encuentra su declaración ambiental disponible en la web se SEA.

**Tabla A-1.3. Caracterización de la caldera según datos declaración de ingreso al SEA.**

Nombre	Tipo ingreso	Titular	Tipo caldera	Potencia térmica	Capacidad	Combustible
ASERRADERO EL COLORADO	DIA	Aserraderos Arauco S.A.	de vapor	no declara	25 ton/h	biomasa

Fuente: SEA, 2018

## Anexo 2. Consumos de Leña por quintiles

**Tabla A-2. Consumos de leña para calefacción residencial en la comuna de Curanilahue, por quintiles de ingreso.**

Consumos	Quintil1 (kg/año-hogar)	Quintil2 (kg/año-hogar)	Quintil3 (kg/año-hogar)	Quintil4 (kg/año-hogar)	Quintil5 (kg/año-hogar)	Promedio ponderado(kg/año-hogar)
Leña	2272	2999	3700	2434	6355	2924

Fuente: EULA-UDEC, 2015