



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**DISPERSIÓN DEL MP₁₀ EN
TEMUCO: CONSTRUCCIÓN DEL
ESCENARIO BASE Y ANÁLISIS DEL
CUMPLIMIENTO DE LA
NORMATIVA AMBIENTAL**

DANIELA SOLEDAD STOCKER TOLOSA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
HÉCTOR JORQUERA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, Agosto, 2010.
© 2010, Daniela Stocker Tolosa



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**DISPERSIÓN DEL MP₁₀ EN
TEMUCO: CONSTRUCCIÓN DEL
ESCENARIO BASE Y ANÁLISIS DEL
CUMPLIMIENTO DE LA
NORMATIVA AMBIENTAL**

DANIELA SOLEDAD STOCKER TOLOSA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

HÉCTOR JORQUERA GONZÁLEZ

CRISTIÁN ESCAURIAZA MESA

MARCELO MENA CARRASCO

PABLO PASTÉN GONZÁLEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Agosto, 2010.

Con todo mi cariño a mis papás,
esperando hacerlos sentir orgullosos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente al profesor Héctor Jorquera por su permanente guía y supervisión en este proceso; por su buena disposición a atenderme siempre cabal y detalladamente; y por su cercanía y buena voluntad. A Eduardo Schlee de CONAMA IX, por su disposición a aclarar mis dudas y a facilitarme información para esta Tesis. A todos los que pertenecen o pertenecieron al área de Soluciones Ambientales de DICTUC: a Julio Castro por toda la ayuda en conocimientos prestada durante el desarrollo de esta Tesis; a Clarita por su cariño y alegría; y a Claudia, Pía, Rodrigo, Enrique, Víctor, Héctor y Hugo por los momentos compartidos. Un especial agradecimiento a Marcia y Soraya, alumnas del profesor Jorquera que más que ser sólo compañeras, llegaron a ser mis amigas, por compartir conmigo la experiencia diaria de este trabajo; por la compañía y apoyo fundamental que resultaron ser para sacar adelante esta Tesis, ya que sin ellas todo hubiera sido más difícil. A mis hermanos por su compañía. A Mauricio por sus ánimos, paciencia y disposición a ayudar. A Cristina por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia permanente. Y por último, pero lo más importante, a mis papás, Roberto y Marisol, por creer siempre ciegamente en mí y por todo el amor y cariño que constantemente me entregan.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
I. Introducción.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis.....	4
1.3. Objetivos	4
II. Antecedentes.....	6
2.1. Introducción a la contaminación atmosférica	6
2.2. El material particulado respirable MP ₁₀	12
2.3. Legislación vigente en Chile.....	14
2.4. Calidad del aire en Temuco y Padre las Casas.....	17
III. Marco teórico.....	24
3.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF.....	24
3.1.1. Antecedentes.....	25
3.1.2. Visión general.....	26
3.1.3. Modelo meteorológico CALMET	29
3.1.4. Modelo de dispersión CALPUFF	33
3.1.5. Análisis estadístico	37

3.2.	Modelación inversa, mediante filtro de Kalman	41
3.2.1.	Modelación inversa matricial	43
3.2.2.	Filtro de Kalman	46
3.2.3.	Aplicación del filtro de Kalman en contaminación atmosférica....	48
3.3.	Simulación de Monte Carlo	51
IV.	Metodología.....	54
4.1.	Simulación en el sistema de modelación CALPUFF	54
4.1.1.	Meteorología.....	54
4.1.2.	Topografía.....	66
4.1.3.	Usos de suelo	68
4.1.4.	Radiosondeo	69
4.1.5.	Emisiones.....	70
4.1.6.	Receptores.....	82
4.2.	Modelación inversa, mediante filtro de Kalman	82
4.2.1.	Pasos previos	83
4.2.2.	Implementación del filtro de Kalman	89
4.2.3.	Reducción de emisiones para el cumplimiento de la normativa ambiental del MP ₁₀	94
4.3.	Simulación de Monte Carlo	96
4.3.1.	Implementación	97
V.	Análisis de resultados	100
5.1.	Simulación en el sistema de modelación CALPUFF.....	100
5.2.	Modelación inversa, mediante filtro de Kalman	112
5.2.1.	Emisiones.....	112
5.2.2.	Concentraciones.....	121
5.2.3.	Reducción de emisiones para el cumplimiento de la normativa ambiental del MP ₁₀	127
5.3.	Simulación de Monte Carlo	133

VI. Conclusiones.....	141
6.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF.....	141
6.1.1. Opciones de mejoramiento de la simulación.....	142
6.2. Modelación inversa, mediante filtro de Kalman.....	143
6.3. Simulación de Monte Carlo.....	146
Bibliografía.....	147
A N E X O S.....	150
Anexo A: Emisiones estacionales por polígono.....	151
Anexo B: Código MATLAB [®] utilizado para realizar modelación inversa.....	152
Anexo C: Monitoreo Ambiental.....	154
Anexo D: Código MATLAB [®] utilizado para realizar Simulación de Monte Carlo.....	158
Anexo E: Concentraciones diarias de MP ₁₀ obtenidas de la simulación en CALPUFF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	160
Anexo F: Emisiones diarias corregidas obtenidas de la modelación inversa (ton/día).....	163
Anexo G: Concentraciones obtenidas en Temuco y Padre las Casas para los casos calculados de reducción de emisiones corregidas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	166

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II.1: Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental para MP ₁₀	16
Tabla IV.1: Ubicación de las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas. ...	55
Tabla IV.2: Emisiones de MP ₁₀ estacionales de todas las fuentes (ton).	71
Tabla IV.3: Emisiones de MP ₁₀ estacionales de las fuentes puntuales (ton).	75
Tabla IV.4: Emisiones de MP ₁₀ estacionales de las fuentes de área (ton).	76
Tabla IV.5: Toneladas anuales de MP ₁₀ emitidas por tipo de fuente de grilla y por polígono (ton/año).	80
Tabla IV.6: Superficie y emisión por unidad de área de los polígonos en los que fue dividido el dominio para organizar las emisiones de las fuentes tipo grilla.	80
Tabla IV.7: Regresiones robustas encontradas para ambas comunas, para las dos épocas del año (µg/m ³).	85
Tabla IV.8: Porcentaje de las concentraciones observadas correspondiente a <i>background</i> regional para ambas comunas, para las dos épocas del año (%).	88
Tabla IV.9: Criterios para determinar si las normas diaria y anual de MP ₁₀ se encuentran superadas en sus niveles de saturación o latencia.	96
Tabla IV.10: Valores entre los que se variaron aleatoriamente los parámetros σ_R , ξ_1 y ξ_t en la simulación de Monte Carlo (%).	98
Tabla V.1: Estadística de las concentraciones diarias simuladas para ambos receptores.	103
Tabla V.2: Comparación entre las concentraciones observadas y las obtenidas de la simulación más la estimación del <i>background</i> regional para la comuna de Temuco. ...	109

Tabla V.3: Comparación de la cantidad de días con concentraciones superiores a 120 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de las observaciones y de las concentraciones obtenidas de la simulación más el <i>background</i> regional para la comuna de Temuco.	109
Tabla V.4: Comparación entre las concentraciones observadas y las obtenidas de la simulación más la estimación del <i>background</i> regional para la comuna de Padre las Casas.	110
Tabla V.5: Resultados del análisis estadístico de las concentraciones observadas y las simuladas en CALPUFF, considerando el <i>background</i> regional, para ambas comunas.	111
Tabla V.6: Resumen con los valores representativos de las emisiones diarias originales ingresadas a la modelación inversa y las corregidas para ambas comunas.....	114
Tabla V.7: Emisiones totales mensuales originales y corregidas con modelación inversa para ambas comunas y para el total.....	117
Tabla V.8: Estadísticas de los factores diarios de corrección de la emisión para ambas comunas.....	119
Tabla V.9: Resultados del análisis estadístico de las concentraciones observadas y las corregidas por el filtro, incorporando el <i>background</i> , para ambas comunas.	126
Tabla V.10: Porcentajes mínimos en los que se deben reducir las emisiones corregidas del polígono de Temuco para cumplir con las normas diaria y anual, en los niveles de saturación y latencia (%). Entre paréntesis se presenta la reducción que dicho porcentaje representa (ton/año).....	128
Tabla V.11: Concentraciones obtenidas en los receptores de ambas comunas al disminuir las emisiones corregidas de Temuco en un 30%.....	128
Tabla V.12: Porcentajes mínimos en los que se deben reducir las emisiones corregidas de los polígonos de Temuco y Padre las Casas para cumplir con las normas diaria y anual, en los niveles de saturación y latencia (%). Entre paréntesis se presenta la reducción que dicho porcentaje representa (ton/año).....	129

Tabla V.13: Concentraciones obtenidas en los receptores de ambas comunas al disminuir las emisiones corregidas de Temuco y Padre las Casas en un 18%.....	130
Tabla V.14: Reducción de emisiones debidas a consumo de leña necesaria para alcanzar niveles de latencia de la norma diaria.	131
Tabla V.15: Valores medidos de emisiones de diversos tipos de estufas a leña, en mg MP ₁₀ /MJ, y el porcentaje de reducción de emisiones que se obtendría al pasar desde cada uno de los artefactos presentados a una estufa a pellets de madera (%).	132

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura II.1: Evolución de los percentiles 98 anuales de las concentraciones de MP ₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2001 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	18
Figura II.2: Evolución de los percentiles 98 anuales de las concentraciones de MP ₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Padre las Casas entre los años 2003 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	19
Figura II.3: Evolución de las concentraciones anuales de MP ₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2001 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	20
Figura II.4: Evolución de las concentraciones anuales de MP ₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Padre las Casas entre los años 2003 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	20
Figura II.5: Evolución de los percentiles 99 anuales de los máximos diarios de las concentraciones horarias de CO registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).	21
Figura II.6: Evolución de las concentraciones anuales de NO _x registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).	22
Figura II.7: Evolución de las concentraciones anuales de NO registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).	22
Figura II.8: Evolución de los percentiles 99 anuales de los máximos diarios de concentración horaria de NO ₂ registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppb).	23
Figura III.1: Esquema de la configuración del sistema de modelación CALPUFF. En negro: componentes internos de CALPUFF y en gris: modelos externos que interactúan con los de CALPUFF.	28

Figura IV.1: Imagen satelital de los límites del dominio de simulación utilizado (en rojo) y de las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas (en azul).	56
Figura IV.2: Rosa de los vientos para todo el día (de 00:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Temuco.....	58
Figura IV.3: Rosa de los vientos para el día (de 08:00 a 19:00 hrs.) en la estación de Temuco.....	59
Figura IV.4: Rosa de los vientos para la noche (de 20:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Temuco.....	59
Figura IV.5: Rosa de los vientos para la madrugada (de 00:00 a 07:00 hrs.) en la estación de Temuco.....	60
Figura IV.6: Rosa de los vientos para todo el día (de 00:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.....	61
Figura IV.7: Rosa de los vientos para el día (de 08:00 a 19:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.....	62
Figura IV.8: Rosa de los vientos para la noche (de 20:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.....	62
Figura IV.9: Rosa de los vientos para la madrugada (de 00:00 a 07:00 hrs.) en la estación Padre las Casas.....	63
Figura IV.10: Perfiles anuales de temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s) en la estación de Temuco.....	64
Figura IV.11: Perfiles anuales de temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s) en Padre las Casas.....	64
Figura IV.12: Visualización en CALPUFF del archivo de topografía del dominio de simulación.	67
Figura IV.13: Grilla con los tipos de usos de suelos presentes dentro del dominio de simulación.	69

Figura IV.14: Participación por tipo de fuente en las emisiones totales del año 2005 del dominio de simulación.	71
Figura IV.15: Ubicación de las fuentes puntuales dentro del dominio de simulación en CALPUFF.	72
Figura IV.16: Perfil de emisión diario Caldera por estación, con factores de emisión horarios.....	74
Figura IV.17: Perfil de emisión diario Industria, con factores de emisión horarios.	74
Figura IV.18: Fuentes de área utilizadas en la simulación como correspondientes a las fuentes móviles.....	77
Figura IV.19: Participación de los diferentes tipos de fuentes en la emisión total de las fuentes tipo grilla.....	78
Figura IV.20: Polígonos en los que fue dividido el dominio de simulación para organizar las emisiones de las fuentes tipo grilla de Airviro.	79
Figura IV.21: Perfil de emisiones diario Residencial por estación, con factores de emisión horarios.....	81
Figura IV.22: Perfil de emisiones diario Calles por estación, con factores de emisión horarios.....	82
Figura IV.23: Relación entre las concentraciones simuladas en CALPUFF y las observadas en el monitoreo ambiental, para el receptor de la comuna de Temuco para la época cálida y fría. En negro: regresión lineal de mínimos cuadrados a modo de referencia, y en rojo: regresión lineal de mínimos cuadrados robusta utilizada para la estimación del <i>background</i> regional.	86
Figura IV.24: Relación entre las concentraciones simuladas en CALPUFF y las observadas en el monitoreo ambiental, para el receptor de la comuna de Padre las Casas para la época cálida y fría. En negro: regresión lineal de mínimos cuadrados a modo de	

referencia, y en rojo: regresión lineal de mínimos cuadrados robusta utilizada para la estimación del <i>background</i> regional.	87
Figura V.1: Mapa de concentraciones promedio anuales sobre el dominio de simulación, obtenido de la simulación realizada en CALPUFF para el año 2006.	101
Figura V.2: Concentraciones diarias de MP ₁₀ simuladas en CALPUFF (µg/m ³) para los receptores de Temuco y Padre las Casas con todas las fuentes del dominio activas.	102
Figura V.3: <i>Box plot</i> mensual de las concentraciones diarias simuladas para el receptor de Temuco.	104
Figura V.4: <i>Box plot</i> mensual de las concentraciones diarias simuladas para el receptor de Padre las Casas.	104
Figura V.5: Relación entre las concentraciones simuladas y observadas para la comuna de Temuco y su respectiva línea de tendencia y ecuación lineal representativa.	106
Figura V.6: Relación entre las concentraciones simuladas y observadas para la comuna de Padre las Casas y su respectiva línea de tendencia y ecuación lineal representativa.	107
Figura V.7: Concentraciones diarias de MP ₁₀ (µg/m ³) en el receptor de Temuco. En rojo: concentraciones observadas y en azul: concentraciones simuladas más el <i>background</i> regional.	108
Figura V.8: Concentraciones diarias de MP ₁₀ (µg/m ³) en el receptor de Padre las Casas. En rojo: concentraciones observadas y en azul: concentraciones simuladas más el <i>background</i> regional.	108
Figura V.9: Emisiones diarias de MP ₁₀ originales y corregidas con la modelación inversa para Temuco y Padre las Casas.	113
Figura V.10: <i>Box plot</i> mensual de las emisiones diarias corregidas para la comuna de Temuco.	115

Figura V.11: <i>Box plot</i> mensual de las emisiones diarias corregidas para la comuna de Padre las Casas.....	115
Figura V.12: <i>Box plot</i> anual de los factores de corrección $f = \frac{\hat{X}}{X_a}$ obtenidos de los resultados generados con CALPUFF para las comunas de Temuco y Padre las Casas. 118	
Figura V.13: <i>Box plot</i> mensual de los factores de corrección para la comuna de Temuco.	119
Figura V.14: <i>Box plot</i> mensual de los factores de corrección para la comuna de Padre las Casas.	120
Figura V.15: Concentraciones diarias de MP ₁₀ (µg/m ³) en la estación de monitoreo de Temuco. En rojo: observaciones y en azul: estimaciones a posteriori u óptimas más el <i>background</i> total.....	123
Figura V.16: Concentraciones diarias de MP ₁₀ (µg/m ³) en la estación de monitoreo de Padre las Casas. En rojo: observaciones y en azul: estimaciones a posteriori u óptimas más el <i>background</i> total.	124
Figura V.17: Grados de libertad del sistema para el año 2006 (estaciones/día).	125
Figura V.18: Emisiones diarias corregidas por modelación inversa y Monte Carlo para Temuco.....	134
Figura V.19: Emisiones diarias corregidas por modelación inversa y Monte Carlo para Padre las Casas.....	134
Figura V.20: Desviaciones estándar diarias de las emisiones diarias corregidas de MP ₁₀ obtenidas de la simulación de Monte Carlo para Temuco y Padre las Casas.	135
Figura V.21: <i>Box plot</i> mensual de las emisiones diarias corregidas obtenidas con Monte Carlo para la comuna de Temuco.....	136
Figura V.22: <i>Box plot</i> mensual de las emisiones diarias corregidas obtenidas con Monte Carlo para la comuna de Padre las Casas.....	137

Figura V.23: Coeficientes de variación $c_v = \frac{\sigma}{\mu}$ diarios para Temuco y Padre las Casas.

..... 138

Figura V.24: *Box plot* anual de los coeficientes de variación $c_v = \frac{\sigma}{\mu}$ obtenidos de los

resultados de la modelación de Monte Carlo para las comunas de Temuco y Padre las Casas. 139

RESUMEN

En la zona urbana de las comunas de Temuco y Padre las Casas, actualmente se exceden las normas primarias diaria y anual para el material particulado respirable MP_{10} , principalmente por el uso de leña para calefacción, por lo que la zona ha sido declarada saturada por la autoridad.

El objetivo de la presente Tesis consistió en: a) modelar la dispersión de las emisiones atmosféricas en Temuco para el año 2006, usando un inventario estimado para el año 2005; b) evaluar cuantitativamente el desempeño del modelo de dispersión CALPUFF (EPA-EEUU) para el año 2006 y diagnosticar las deficiencias de dicho inventario; c) calibrar el inventario de emisiones para el año 2006, por medio de la metodología de modelación inversa, específicamente del filtro de Kalman; d) construir un escenario de emisiones modificado para el año 2006, y con él estimar cuales serían las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con las normas, considerando diversos escenarios y verificando su factibilidad tecnológica.

Las emisiones anuales totales corregidas fueron $4.534 \pm 18,7$ ton, un 101% de las originales, sin embargo se encontró que éstas se encontraban mal distribuidas en el territorio urbano, al ser las emisiones corregidas del polígono definido como Temuco $1.125 \pm 6,3$ ton, un 40% de las originales, y las del polígono definido como Padre las Casas $3.409 \pm 17,6$ ton, un 205% del valor original.

Por último se obtuvo que debían reducirse en un 30% las emisiones corregidas del polígono de Temuco, o bien en un 18% las de ambos polígonos, para cumplir con la norma diaria. Sin embargo, en el escenario más exigente, que requiere que Temuco no esté en latencia por la norma diaria, se deberían reducir en un 70% las emisiones del polígono de Temuco, o bien en un 47% las de ambos polígonos, hecho cuya factibilidad técnica fue probada con una búsqueda bibliográfica.

ABSTRACT

The urban area formed by the cities of *Temuco* and *Padre las Casas*, has been declared a non-attainment PM_{10} area because ambient PM_{10} concentrations therein exceed both daily and annual standards, mainly due to residential wood consumption for space heating and cooking.

The aim of this Thesis was to: a) simulate current PM_{10} emission inventory using CALPUFF dispersion model for year 2006; b) assess quality of base inventory and corrections needed; c) correct emission inventory by using a Kalman filter approach, assimilating available ambient PM_{10} observations for 2006; d) for the corrected emissions, estimate the percentage of emission reduction needed to achieve compliance with ambient PM_{10} standards for different scenarios, checking whether those reductions are feasible or not.

The aggregated corrected annual emissions were found to be $4.534 \pm 18,7$ ton, a 101% of the original, a priori emissions. However, a priori annual inventory was wrongly distributed across the urban area; for *Temuco*'s polygon they corresponded to $1.125 \pm 6,3$ ton, a 40% of the a priori emissions, while for the *Padre las Casas*' polygon the corrected emission corresponded to $3.409 \pm 17,6$ ton, a 205% of the a priori value.

Finally, we have found that corrected PM_{10} emissions from Temuco ought to be reduced by 30% or both cities by 18% to achieve compliance with the daily ambient standard. However, if we impose the condition that Temuco's daily PM_{10} concentrations fall all below 80% of the ambient standard, a so-called latency status, then a 70% of emission reduction is required at Temuco, or a 47% reduction for both cities, fact which was proved by a search for data on wood stove emissions from different equipments.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El material particulado respirable MP_{10} , que consiste en aquellas partículas sólidas suspendidas en el aire que tienen un diámetro inferior a los 10 μm , representa uno de los contaminantes asociados “a daños más severos a la salud de las personas, como incrementos en mortalidad prematura, bronquitis crónica, etc.” (Jorquera, 2008). Es por esto que en Chile, a partir del año 1998, sus concentraciones en el ambiente se encuentran reguladas. En este contexto regulatorio, la ciudad de Temuco, correspondiente al área urbana de las comunas de Temuco y Padre las Casas, fue declarada en 2005 zona saturada por MP_{10} , para las concentraciones promedio de 24 horas, obligando así a la autoridad a implementar un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) que establezca las medidas a tomar para reducir estos niveles de contaminación atmosférica a niveles permitidos por la normativa dentro del mediano plazo.

El PDA de Temuco y Padre las Casas fue recientemente aprobado y ya se encuentra en vigencia (publicado en el Diario Oficial de la República el 3 de Junio de 2010), siendo su objetivo principal la recuperación de los niveles de MP_{10} de manera que éstos cumplan con la normativa vigente en un plazo de diez años.

Para que dichas medidas puedan tener mayores y efectivos impactos en la reducción de los niveles de MP_{10} en la zona, resulta de fundamental importancia conocer el origen espacial de las emisiones que generan dichas concentraciones en el ambiente, es decir, contar con un inventario de emisiones confiable y verificado con el monitoreo ambiental disponible.

Los inventarios de emisiones contienen la información correspondiente a todas las emisiones que ocurren dentro de un determinado dominio, para todas las

fuentes de emisión presentes en él. Pese a que la mejor manera de obtener un inventario de emisiones correcto pudiera ser realizando mediciones directas de éstas en cada una de las fuentes emisoras, estos no son generados de esa manera por ser un proceso muy costoso y demoroso. En general se usan métodos que estiman, de variadas maneras, las emisiones del dominio, por ejemplo por medio del uso de factores de emisión calculados previamente que determinan, en función de la cantidad de combustible utilizado, la cantidad de emisiones que su consumo genera, o bien, extrapolando las emisiones de chimeneas más indicadoras de consumos de combustible y perfiles de emisión a todo el año, en base a mediciones puntuales.

Para las comunas de Temuco y Padre las Casas existe sólo un inventario de emisiones correspondiente al año 2005, realizado en base a diferentes encuestas y al uso de diversos factores de emisión. Pese a la mala calidad del aire en Temuco y Padre las Casas, en especial durante los meses de invierno donde la calefacción residencial a leña y las malas condiciones de ventilación generan múltiples episodios con concentraciones muy superiores a las establecidas por las normas, el inventario de emisiones de la zona no ha sido sometido a una verificación que compruebe la validez de éste.

Por otro lado, dado que el objetivo del PDA se encuentra enfocado a las concentraciones y que una modificación de éstas sólo puede realizarse a través de una modificación de las emisiones que las generan, se puede decir que el objetivo del PDA no resulta muy concreto pues no establece claramente la reducción de emisiones requerida para alcanzar los niveles deseados de concentraciones en el ambiente. A su vez, las medidas establecidas en el PDA, también deberían contar con información cuantificada de la reducción de emisiones que su ejecución traería, con el objeto de medir más fácilmente si dichas medidas serán suficientes para alcanzar el objetivo principal del PDA y simplificar la fiscalización.

Establecido lo anterior, el objetivo de la presente Tesis corresponde a la cuantificación de la reducción de emisiones de MP_{10} necesaria para que en la zona actualmente saturada de las comunas de Temuco y Padre las Casas se cumpla con la

normativa regulatoria vigente, tomando como base los resultados de la evaluación y corrección del inventario de emisiones de ambas comunas, también realizados en el desarrollo de esta Tesis. Lo anterior con el fin de que las autoridades ambientales cuenten con una referencia cuantitativa del efecto que deberían tener las medidas establecidas en el PDA para reducir las concentraciones de MP_{10} en la zona a los niveles permitidos por la normativa y que, por lo tanto, cuenten con un objetivo más específico y medible.

Las mencionadas evaluación y corrección del inventario de emisiones se realizaron utilizando la metodología de modelación inversa, con una aplicación similar a la utilizada en los trabajos de Álamos Guzmán (2010) y Ruiz Reinoso (2010). Específicamente, la modelación inversa corrige las emisiones diarias originales de forma que, al utilizarlas en una simulación con un modelo de dispersión, las concentraciones simuladas se aproximen a las observadas en las estaciones de monitoreo existentes, siendo esta aproximación mejor a la obtenida con los resultados de la simulación realizada con las emisiones originales. Además, la modelación inversa permite encontrar la relación diaria existente entre emisiones y concentraciones, relación necesaria para calcular la reducción de emisiones anteriormente mencionada.

La metodología de modelación inversa ha sido utilizada anteriormente para evaluar y corregir inventarios de emisiones de fuentes puntuales (Álamos Guzmán, 2010) y de fuentes móviles (Ruiz Reinoso, 2010). En la presente Tesis en cambio, se utilizará para corregir emisiones de ambos tipos de fuentes de forma simultánea. Además, la aplicación de la metodología en la presente Tesis presentará ciertas diferencias con respecto a las aplicaciones anteriormente realizadas pues se corregirán emisiones de un contaminante cuya componente correspondiente a emisiones de fondo o de *background* no es despreciable, como sí ocurrió para los anteriores contaminantes atmosféricos estudiados con modelación inversa (SO_2 y CO), por lo que, previo a la modelación inversa en la presente Tesis, se estimará el aporte que dichas emisiones de *background* tenían sobre las concentraciones simuladas y observadas, y se desarrollará la metodología tomando en consideración ese aspecto. Por último, se debe mencionar

que la presente Tesis realiza un aporte al ir más allá de la corrección del inventario de emisiones, utilizando los resultados de la modelación inversa en procedimientos adicionales para generar información útil para apoyar instrumentos de gestión de la contaminación atmosférica, como lo es en particular el PDA de Temuco y Padre las Casas.

1.2. Hipótesis

Como hipótesis de la presente Tesis, se postula que el inventario de emisiones de MP_{10} de las comunas de Temuco y Padre las Casas puede ser corregido por medio de la metodología de modelación inversa, y que los resultados que de ésta se obtengan permiten obtener una estimación de la reducción de emisiones necesaria para que se alcancen niveles de MP_{10} legalmente aceptables en la zona, entregando así a las autoridades ambientales información de apoyo para la gestión del PDA de Temuco y Padre Las Casas.

1.3. Objetivos

Además del objetivo principal de esta Tesis, que corresponde a la cuantificación de la reducción de emisiones de MP_{10} en las comunas de Temuco y Padre las Casas, necesaria para que las concentraciones de MP_{10} cumplan con las normas primarias de calidad ambiental actuales, se tienen los siguientes objetivos:

- i) Evaluar cuantitativamente el inventario de emisiones de MP_{10} disponible para Temuco y Padre las Casas, mediante una simulación de la dispersión de dichas

emisiones en la zona urbana, comparando observaciones con simulaciones de MP_{10} para el año 2006.

- ii) Corregir el inventario de emisiones de MP_{10} disponible con modelación inversa, asimilando las observaciones del monitoreo del año 2006 y usando técnica de Monte Carlo para estimar la incertidumbre en las emisiones corregidas.
- iii) Con el inventario 2006 corregido, estimar las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con las normas de calidad primaria, diaria y anual, en ambas comunas.
- iv) Verificar con información de la literatura si las reducciones de emisión requeridas son tecnológicamente factibles o no.

II. ANTECEDENTES

2.1. Introducción a la contaminación atmosférica

En las últimas décadas la contaminación atmosférica ha ido tomando más importancia en la conciencia de la gente: lentamente se ha ido cambiando la percepción de que la atmósfera constituía un recurso ilimitado y capaz de recibir grandes cantidades de contaminantes gaseosos, por la idea de que es un recurso limitado, irremplazable y de fundamental importancia para la existencia del equilibrio en el planeta. Específicamente, este cambio en los paradigmas humanos se ha visto acelerado por la conciencia y preocupación que existen hoy en día frente al tema del cambio climático, fenómeno que ha demostrado con evidencias concretas que el exceso de contaminación atmosférica en el planeta puede provocar consecuencias irreversibles a nivel global, afectando la vida de todos los habitantes en el mundo.

La contaminación atmosférica corresponde a la introducción de químicos o materiales a la atmósfera que, o bien pueden mezclarse con ella debido a que corresponden a compuestos en estado gaseoso, o unirse a ella manteniéndose en suspensión por un tiempo, para el caso de materiales en estado sólido (partículas).

La contaminación atmosférica proviene de las llamadas fuentes de emisión que, a mayor emisión de contaminantes, generan mayores concentraciones de éstos en el aire, empeorando su calidad. Para Jorquera (2008) los efectos de una mala calidad del aire se pueden clasificar, de acuerdo al receptor siendo afectado, en:

- Efectos en la salud de la población expuesta.
- Efectos en ecosistemas y agricultura.

- Daños a materiales y patrimonio cultural.
- Efectos estéticos.

Donde, sin duda, el efecto más importante de mantener vigilado corresponde al producido sobre la salud de la población expuesta. Debido al directo efecto de las emisiones sobre la salud de las personas, es que el monitoreo ambiental resulta fundamental en la evaluación de la calidad del aire y, en caso de que ésta no cumpla con los estándares de calidad del aire existentes, a la hora de tomar medidas para mejorarla.

Generalmente el monitoreo ambiental se realiza sobre los contaminantes que más afectan la salud de la población y que normalmente abundan en zonas urbanas o industriales. Jorquera (2008) presenta algunos de los contaminantes que comúnmente se encuentran regulados en el mundo:

- Material particulado respirable (MP_{10}): Corresponde a partículas sólidas de menos de $10\ \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico que se encuentran suspendidas en el aire y que provienen del consumo de combustibles fósiles (en fuentes móviles y estacionarias), del procesamiento de grandes volúmenes de materiales sólidos, y de la industria manufacturera en general.

- Monóxido de Carbono (CO): Es un gas generado en procesos de combustión incompleta, incoloro e inodoro. Después de uno o dos meses en la atmósfera eventualmente se oxida a dióxido de carbono (CO_2).

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x): Corresponden al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO_2). Son generados principalmente en procesos de combustión a altas temperaturas que involucran la presencia de nitrógeno y oxígeno.

- Compuestos orgánicos volátiles (COV): Compuestos orgánicos que generalmente se presentan en forma de vapor cuando se encuentran a temperatura ambiente. Están asociados a procesos de combustión incompleta, al uso de solventes en operaciones con pintura o limpiadores, y a la evaporación de combustibles líquidos.

- Óxidos de azufre (SO_x): Corresponden mayoritariamente a dióxido de azufre (SO_2) y, en menor medida, a trióxido de azufre (SO_3). Se producen en la quema de combustibles que contienen azufre.

- Ozono (O_3): Como producto de un ciclo de reacciones químicas y fotoquímicas que involucran la combinación de COV y NO_x se produce ozono en el ambiente. Al ser éste un contaminante producido en el ambiente y no necesariamente emitido, corresponde a un contaminante secundario.

Por otro lado, además de requerirse el monitoreo ambiental en la zona de interés, resulta importante construir un inventario de emisiones atmosféricas para poder comparar la información que ambas partes entregan. Específicamente, el inventario de emisiones proporciona información referente a la cantidad de emisiones que tienen efecto sobre la calidad del aire del lugar en estudio, identificando las fuentes emisoras y cuantificando sus respectivas emisiones.

Para realizar un inventario de emisiones, se debe comenzar por identificar las diferentes fuentes involucradas y clasificarlas en las siguientes categorías:

i) Fuentes estacionarias: Fuentes con una ubicación fija y que pueden ser:

- Puntuales: La emisión se realiza de manera muy localizada, como pudiera corresponder a una chimenea que descarga gases y partículas provenientes de algún proceso de alta temperatura.

- De área: La emisión se realiza a través de una superficie, como pudiera ser una quema agrícola, pero ni su posición en el espacio ni su intensidad se encuentran bien definidas. También podría corresponder a una agrupación de varias fuentes puntuales muy pequeñas ubicadas dentro de una zona, como a fuentes de calefacción residencial, consumo de solventes domésticos, etc.

ii) Fuentes móviles: Corresponden a todas las fuentes que se encuentran en movimiento y que hacen que la procedencia de la emisión sea variable en el tiempo, como podrían ser los vehículos. A su vez se clasifican en:

- En ruta: Cuando las fuentes móviles se encuentran en caminos establecidos.

- Fuera de ruta: Cuando la emisión se realiza fuera de caminos establecidos, por ejemplo por el uso de maquinaria pesada en obras de construcción, o en actividades agrícolas.

iii) Fuentes fugitivas: En general corresponden a fuentes de polvo natural y son muy difíciles de estimar o medir ya que son difusas e intermitentes, como podría ser una construcción o el levantamiento de polvo en un camino.

Una vez identificadas las fuentes de emisión se deben cuantificar sus respectivas emisiones considerando tanto el nivel de actividad de dicha fuente, que generalmente corresponde a la tasa a la que consume combustible, como el factor de emisión específico de la actividad, que equivaldría en este caso a la producción de

contaminante generada por unidad de combustible consumida. Dicha relación se presenta en la Ecuación (2.1).

$$\text{Emisión} \left[\frac{\text{ton}_{\text{contam.}}}{\text{año}} \right] = \text{Nivel de actividad} \left[\frac{\text{ton}_{\text{combust.}}}{\text{año}} \right] \times \text{Factor de emisión} \left[\frac{\text{ton}_{\text{contam.}}}{\text{ton}_{\text{combust.}}} \right] \quad (2.1)$$

Muchos factores de emisión pueden encontrarse calculados en la literatura especializada, pero, de acuerdo a Jorquera (2008), éstos deben ser utilizados con cautela pues dependen directamente de las condiciones locales en las que fueron calculados, debiendo por ello procurar seleccionar los factores de emisión calculados en condiciones lo más similares posibles a las del caso particular al cual se desea aplicar.

Dado que generalmente los inventarios de emisiones se construyen en base a estimaciones que simplifican los cálculos, y no a partir de datos medidos directamente en las fuentes de emisión, ellos pueden tener grandes incertidumbres implícitas; sin embargo, la información recogida por el monitoreo ambiental permite dar luces de la incertidumbre contenida en dichas estimaciones. Específicamente, los modelos de dispersión son los que relacionan cuantitativamente las emisiones con las concentraciones ambientales de los contaminantes atmosféricos, y los que, por lo tanto, permiten evaluar qué tan sesgado se encuentra un determinado inventario de emisiones.

Un clásico modelo de dispersión corresponde a los modelos Gaussianos que permiten estimar la concentración de un determinado contaminante en cualquier punto de la zona de impacto de la emisión constante de una chimenea para un tiempo t , por medio de la Ecuación (2.2) (Crank, 1986; Cussler, 1984).

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{8 \pi Dt} \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt} \right\} \quad (2.2)$$

Donde el origen del sistema de coordenadas utilizado se ubica en el punto de descarga de la chimenea; el eje x se define haciéndolo coincidir con la dirección del viento; el eje z con la altura; c corresponde a la concentración en el punto que se desea calcular ésta; M a la emisión de la chimenea y D al coeficiente de difusión del contaminante en el aire.

El modelo se basa en que asume que la difusión de la emisión de contaminante en el aire, de acuerdo a la Ley de Fick, genera una distribución normal de la concentración del contaminante en torno al eje de simetría dado por el eje x.

La Ecuación (2.2) cuenta con versiones más complejas que consideran tanto la distancia de la fuente al punto donde se quiere calcular la concentración, como las condiciones de estabilidad de la atmósfera en ese momento y lugar, dado que ambos parámetros influyen directamente en la concentración a calcular.

Pese a que los modelos Gaussianos son simples de aplicar, en ellos existen tantas simplificaciones que sus resultados pueden dejar de ser útiles, por ejemplo en situaciones que involucran diferencias significativas en elevaciones del terreno, cambios en la dirección del viento o períodos con velocidades del viento demasiado bajas (Jorquera, 2008). Debido a limitaciones como éstas, es que muchas veces es necesario contar con modelos más avanzados que consideren más especificaciones de la situación y del lugar en los que se desean calcular las concentraciones de contaminante, como es el caso de los modelos de paquetes de contaminantes, generalmente llamados modelos de *puffs*.

Los modelos de *puffs*, en general, representan como un conjunto de *puffs* las emisiones de fuentes, principalmente puntuales, pero de cualquier tamaño, considerando la variación de las emisiones en el tiempo y que éstas son transportadas como paquetes por los vientos dominantes, a medida que se van expandiendo al mezclarse con el aire. Además el modelo puede considerar tanto las reacciones químicas principales que

ocurren en el interior del *puff*, como la deposición seca o húmeda de los contaminantes en el suelo (Jorquera, 2008).

Además de los modelos de *puffs*, existen otros modelos que son más avanzados que los Gaussianos, como son los modelos de caja Lagrangeanos y los de grilla Eulerianos, siendo el uso de estos últimos justificable para evaluar decisiones importantes, por ejemplo a nivel gubernamental, debido a que su desarrollo es costoso tanto en recursos humanos como computacionales.

Por último, a modo de resumen, se debe mencionar que la selección del modelo a utilizar para simular un determinado caso, debe hacerse en función de qué y cómo es lo que se desea modelar y con qué finalidad se está simulando, para, de esta forma, obtener resultados válidos haciendo un uso óptimo de recursos.

2.2. El material particulado respirable MP₁₀

El contaminante que se analizará en la presente Tesis corresponde al material particulado respirable total, también llamado MP₁₀, que, como se mencionó anteriormente, corresponde a partículas sólidas, orgánicas e inorgánicas, suspendidas en el aire y que tienen un diámetro aerodinámico menor a los 10 μm y que, por ser tan pequeñas, tienen la capacidad de ingresar a las partes superiores del sistema respiratorio.

De acuerdo a Jorquera (2008) el MP₁₀ puede provenir tanto de fuentes naturales, como la erosión del suelo por parte del viento; erupciones volcánicas; polen; etc., como de fuentes antropogénicas, tales como el uso de combustibles fósiles en transporte, comercio y residencias; el manejo, procesamiento y transporte de sólidos como el existente en la minería, construcción y agricultura; y de la industria manufacturera en general como fundiciones, molinos, aserraderos, etc.

De acuerdo a la *World Health Organization* (2004), los efectos del MP₁₀ sobre la salud corresponden a:

i) Efectos a corto plazo:

- Reacciones inflamatorias en el pulmón.
- Síntomas respiratorios.
- Efectos adversos en sistema cardiovascular.
- Incremento del uso de medicamentos.
- Incremento en admisiones hospitalarias.
- Incremento en mortalidad prematura.

ii) Efectos a largo plazo:

- Incremento de síntomas en vías respiratorias inferiores.
- Reducción de la capacidad pulmonar en niños.
- Incremento de enfermedades pulmonares obstructivas crónicas.
- Reducción de la capacidad pulmonar en adultos.
- Reducción de la esperanza de vida, principalmente debido a la mortalidad cardiopulmonar y probablemente al cáncer al pulmón.

Por otro lado, a partir de una amplia recopilación de literatura, Jorquera (2008) indica que existen estudios que estimaron que un incremento en la concentración de MP_{10} de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ causaría un aumento en la mortalidad total de la población entre 0,5 y 1,6% a corto plazo, y un aumento varias veces mayor a largo plazo; entre 4 y 7%.

Debido al alto impacto del MP_{10} en la salud de las personas y en su esperanza de vida es que, desde hace años, su presencia en la atmósfera se encuentra regulada en muchos países del mundo, por medio de normativas que pretenden mantener la calidad del aire lo mejor posible, sobretodo en el largo plazo.

2.3. Legislación vigente en Chile

Las leyes chilenas que regulan los temas ambientales se encuentran contenidas en la Ley 19.300: Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que fue creada por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1994) y aprobada por el Congreso Nacional en 1994. Dicha Ley establece, en el Artículo 32, que las normas primarias de calidad ambiental se promulguen por medio de decretos supremos y que sean de aplicación general en todo el país.

Según lo establecido por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1994), en el Artículo 2 de la Ley, una norma primaria de calidad ambiental corresponde a “aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, (...), cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población”.

El decreto supremo, o simplemente D.S., que establece la norma primaria de calidad ambiental para regular el MP_{10} en Chile es el D.S. n° 59 de 16 de marzo de 1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1998), modificado por el D.S. n° 45 de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. En dicho D.S. se establece, en el Artículo 2, que:

- “La norma primaria de calidad del aire para el (...) MP_{10} es (...) $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración de 24 horas”.

- Dicha norma primaria “se considerará sobrepasada (...) cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitora (...), sea mayor o igual a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ”.

- También se considerará sobrepasada la norma, “si antes que concluyese el primer período anual de mediciones certificadas por el Servicio de Salud competente se registrare en alguna de las estaciones monitoras (...), un número de días con mediciones sobre el valor de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mayor que siete”.

- A partir del 1 de enero de 2012 dicha norma será de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a menos que hubiera “entrado en vigencia una norma de calidad ambiental para material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$, en cuyo caso” el valor de la norma actual no se cambiaría.

- “La norma primaria de calidad del aire para el (...) MP_{10} es (...) $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración anual”.

- Dicha norma primaria anual “se considerará sobrepasada (...) cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos en cualquier estación monitora (...), sea mayor o igual que $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ”.

Además, el D.S. n° 59 de 1998, establece en el Artículo 3 los niveles de concentraciones de 24 horas que generan situaciones de emergencia ambiental para MP_{10} y que se presentan en la Tabla II.1.

Tabla II.1: Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental para MP₁₀.

Nivel	Concentración de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Nivel 1	195 – 239
Nivel 2	240 – 329
Nivel 3	330 o superior

Fuente: .Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1998).

Por otro lado, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1994), define en el Artículo 2 de la Ley 19.300 la condición bajo la cual una zona es declarada saturada; que en dicha zona se encuentren sobrepasadas una o más normas de calidad ambiental. Dicho Artículo se relaciona con el D.S. n° 35 de 2005 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (2005) que, en su Artículo único, establece que se declare como “zona saturada por (...) MP₁₀, como concentración de 24 horas, la zona correspondiente a las comunas de Temuco y Padre las Casas (...)”. Esto debido a que, durante los años 2001, 2003 y 2004, las mediciones registradas en la estación de monitoreo de MP₁₀ ubicada en la comuna de Temuco, excedieron la norma primaria de calidad del aire de dicho contaminante, como concentración de 24 horas.

Por último, se debe mencionar que el Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República aprobó en julio de 2009 el PDA de Temuco y Padre las Casas, donde se establecen las medidas a tomar en la zona para que, en un plazo de diez años, se vuelva a cumplir con la norma de calidad primaria que regula el MP₁₀, contenida en el mencionado D.S. n° 59 de 1998.

2.4. Calidad del aire en Temuco y Padre las Casas

La zona de estudio que se utilizará en la presente Tesis corresponde a las comunas de Temuco y Padre las Casas ubicadas en la IX región, región de la Araucanía, de Chile. Ambas comunas cuentan con su propia estación de monitoreo de información meteorológica y de calidad del aire que realizan registros con resolución horaria. En la estación de monitoreo de Temuco se registra CO, NO_x, NO, NO₂ y MP₁₀, mientras que en Padre las Casas sólo se registran los valores de este último.

Como se mencionó anteriormente, ambas comunas fueron declaradas en conjunto como zona saturada en el año 2005, debido a que, en la estación de monitoreo de Temuco, las concentraciones registradas sobrepasaron la norma primaria para el MP₁₀, como concentración de 24 horas, en los años 2001, 2003 y 2004. La aplicación de categoría de zona saturada a ambas comunas, pese a que sólo las mediciones en la comuna de Temuco excedían la norma, se debe a los resultados obtenidos de un análisis de trayectorias de masas de aire realizado por la CONAMA IX Región (2004), que recomiendan que la totalidad de los territorios de ambas comunas, tanto sus zonas urbanas como rurales, sean declarados como saturados.

La Figura II.1 muestra la evolución de los percentiles 98 de MP₁₀ anuales de las concentraciones registradas en la estación de monitoreo de Temuco entre los años 2001 y 2009, donde se observa que sólo en 2002 no se superó la norma primaria diaria para el MP₁₀, aunque sí se constató latencia en dicho año (percentil 98 mayor a 120 µg/m³).

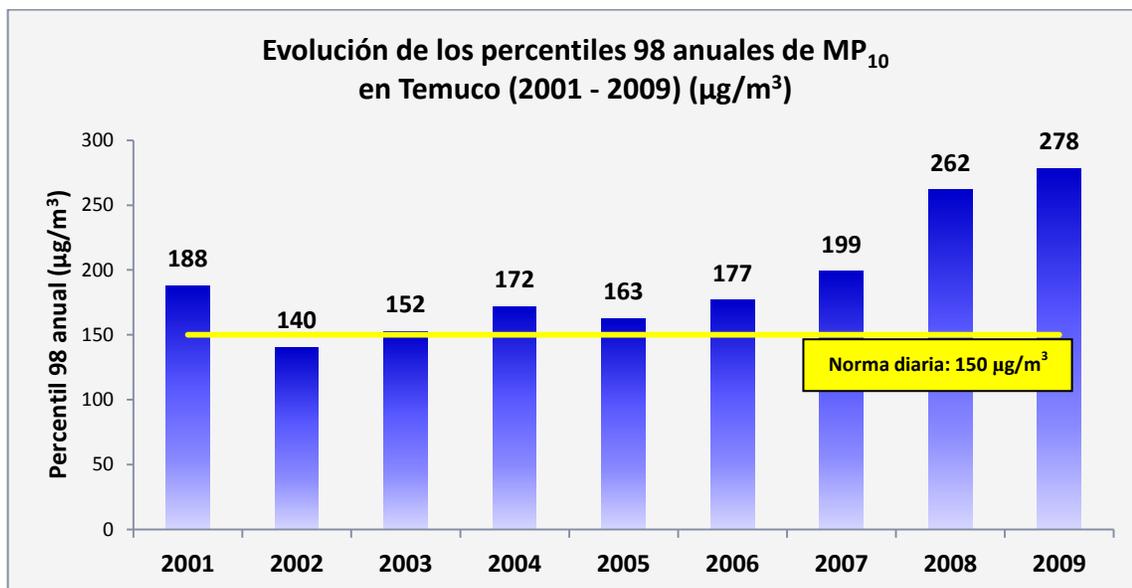


Figura II.1: Evolución de los percentiles 98 anuales de las concentraciones de MP₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2001 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

La Figura II.2, por su parte, muestra la evolución de los percentiles 98 anuales de las concentraciones de MP₁₀ registradas en la estación de Padre las Casas entre los años 2003 y 2009, donde se observa que en este período la norma diaria fue superada sólo en dos oportunidades, a diferencia de la comuna de Temuco que mostró superaciones de la norma en todos los años del mismo período. Pese a esta diferencia, ambas comunas muestran una tendencia, a partir del año 2005, de aumento monótono en sus respectivos percentiles, además de la superación de la norma diaria en ambas comunas en el año 2009. Dicho aumento en las concentraciones de ambas comunas refleja el crecimiento socioeconómico que ha tenido la zona en los últimos años y evidencia la necesidad urgente de tomar medidas efectivas para reducir las emisiones de la ciudad.

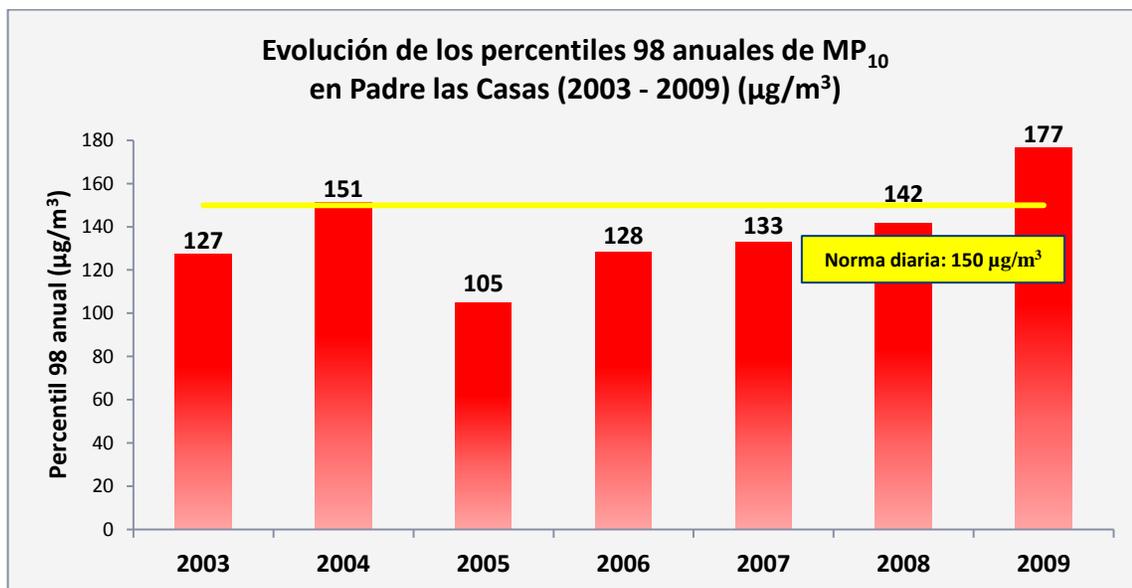


Figura II.2: Evolución de los percentiles 98 anuales de las concentraciones de MP₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Padre las Casas entre los años 2003 y 2009 (µg/m³).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

A su vez, la Figura II.3 y Figura II.4 muestran la evolución de las concentraciones anuales de MP₁₀ registradas en ambas estaciones entre los años 2001 y 2009 para Temuco y entre 2003 y 2009 para Padre las Casas. Ambas comunas muestran una baja en su promedio anual de concentraciones en el año 2005 y un aumento gradual de éstos a valores cercanos a la norma en los años posteriores. Pese a que en la comuna de Padre las Casas no se ha excedido la norma, en la de Temuco se observa que ésta ha sido excedida durante los tres últimos años, además del año 2001, reflejando también que la calidad del aire, en vez de mejorar, ha ido empeorando en el tiempo.

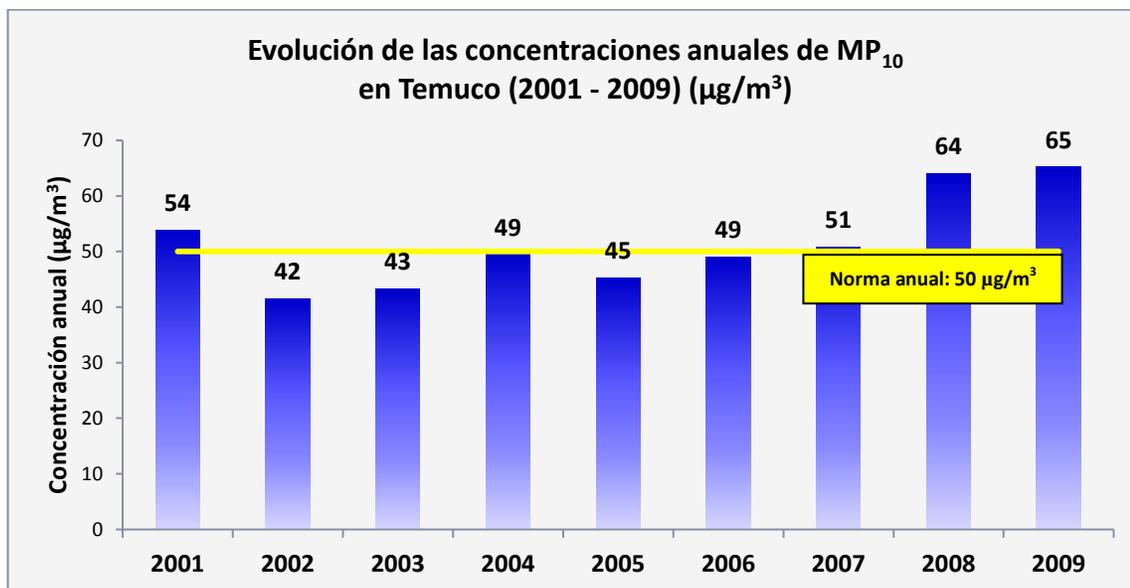


Figura II.3: Evolución de las concentraciones anuales de MP₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2001 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

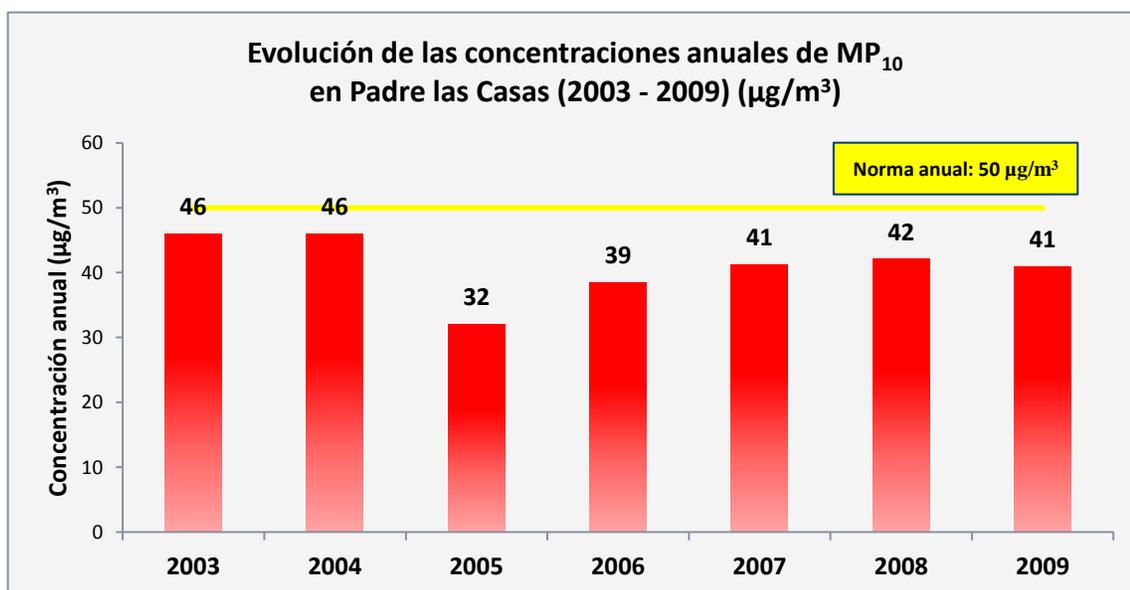


Figura II.4: Evolución de las concentraciones anuales de MP₁₀ registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Padre las Casas entre los años 2003 y 2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

La evolución de los demás contaminantes monitoreados en la estación de Temuco entre los años 2005 y 2009, CO; NO_x; NO y NO₂, se presentan en la Figura II.5, Figura II.6, Figura II.7 y Figura II.8 respectivamente. Para dichos contaminantes, en Chile actualmente sólo existen normas primarias de calidad del aire para el CO y NO₂, normas que no han sido sobrepasadas en dichos años en la comuna de Temuco.

Notar que la tendencia de los óxidos de nitrógeno, NO_x y NO, está claramente a la baja en los últimos años, lo que refleja el mejor desempeño de las fuentes de combustión a alta temperatura, es decir, de los vehículos motorizados debido a la renovación tecnológica del parque. Por el contrario, el CO, indicador de combustión incompleta como en la quema de leña residencial o en vehículos livianos, tiene una tendencia clara al aumento en los últimos años, lo que no puede atribuirse a los vehículos motorizados como ya se ha comentado, ya que ellos deberían haber bajado sus emisiones de CO por tubo de escape.

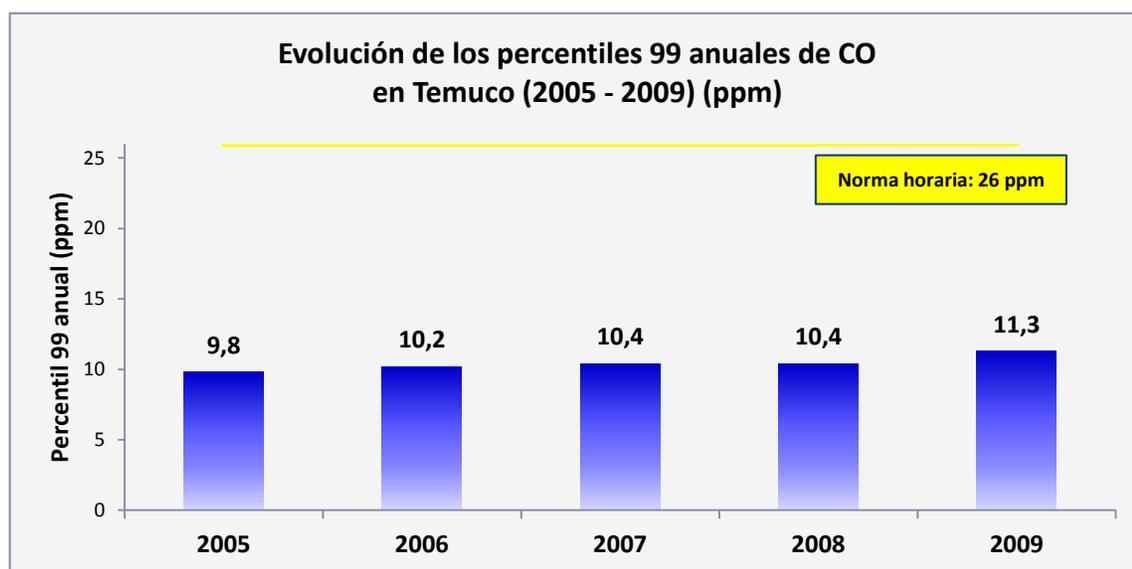


Figura II.5: Evolución de los percentiles 99 anuales de los máximos diarios de las concentraciones horarias de CO registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).

Fuente: CONAMA IX Región (2010).

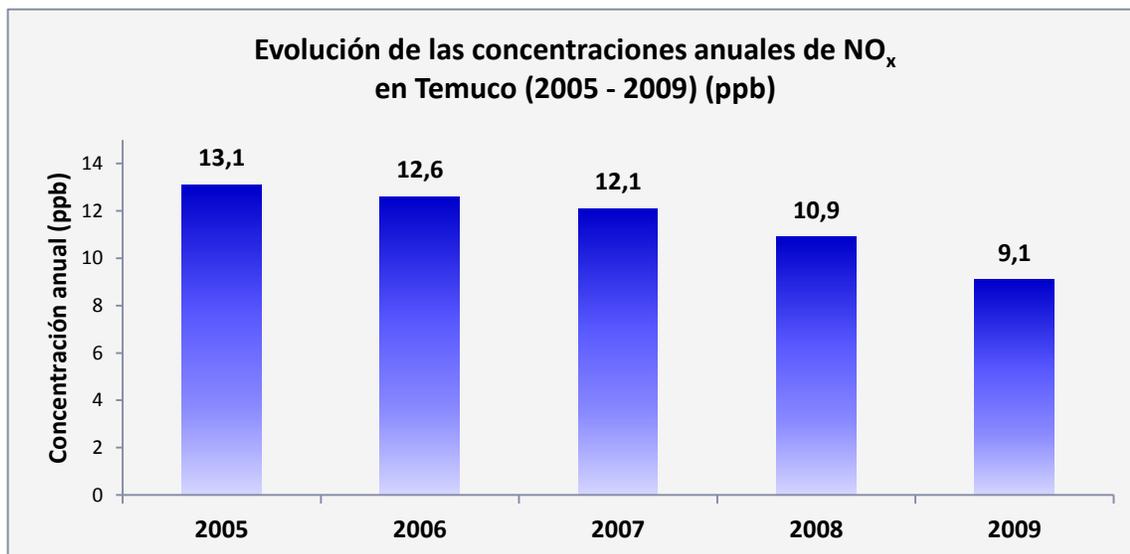


Figura II.6: Evolución de las concentraciones anuales de NO_x registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

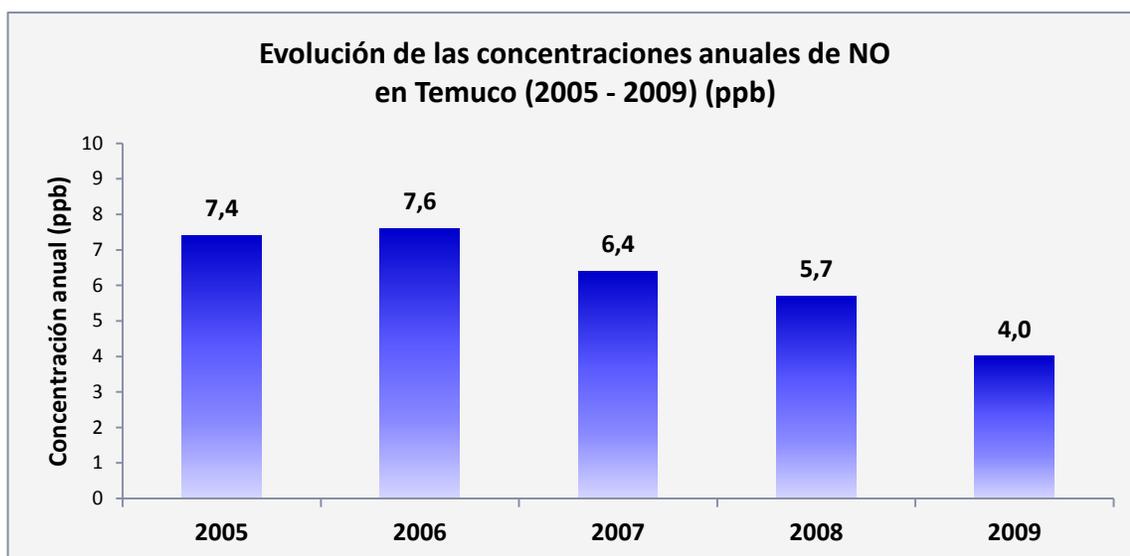


Figura II.7: Evolución de las concentraciones anuales de NO registradas en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppm).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

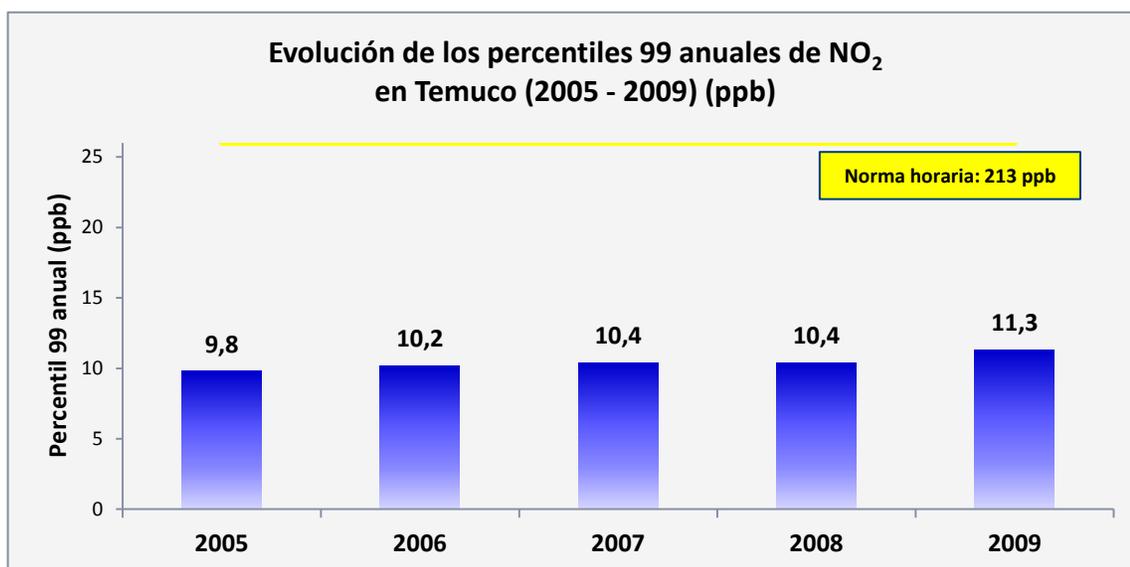


Figura II.8: Evolución de los percentiles 99 anuales de los máximos diarios de concentración horaria de NO₂ registradas en la comuna de Temuco entre los años 2005 y 2009 (ppb).
Fuente: CONAMA IX Región (2010).

III. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presenta la base teórica y detalles técnicos de los procedimientos utilizados en el desarrollo de esta Tesis para alcanzar los objetivos de ésta. Dichos procedimientos fueron a grandes rasgos, pero con variadas diferencias de implementación y finalidad, que se evidenciarán en el Capítulo IV, los utilizados por Álamos Guzmán (2010) y Ruiz Reinoso (2010), correspondiendo éstos a:

- i) Simulación en el sistema de modelación CALPUFF.
- ii) Modelación inversa, mediante filtro de Kalman.
- iii) Simulación de Monte Carlo.

3.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF

El modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos seleccionado para el desarrollo de la presente Tesis correspondió al modelo de *puffs* llamado CALPUFF. Dicho modelo de dispersión es utilizado dentro del sistema de modelación también llamado CALPUFF que se encuentra disponible gratuitamente en internet¹.

Uno de los motivos de la selección de CALPUFF como sistema de modelación se debe a que la *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) lo tiene como uno de sus modelos preferidos y recomendados para ser usado como modelo pauta en aplicaciones regulatorias que involucren transporte de contaminantes. Asimismo, debido

¹ *Atmospheric Studies Group (ASG) at TRC. (2007). CALPUFF (Versión 5.8) [Software] Disponible en ASG at TRC: Official CALPUFF Download Site*”:

http://www.src.com/calpuff/download/download.htm#EPA_VERSION

a que CALPUFF considera la dispersión de contaminantes en estado no estacionario, simulando los efectos de las variaciones de las condiciones meteorológicas, tanto en el tiempo como en el espacio, sobre el transporte de los contaminantes, su transformación y remoción, además de poder ser aplicado a situaciones con transporte de contaminantes de largo alcance y a terrenos complejos, se adapta bastante para representar el contexto de la ciudad de Temuco que se desea simular. (*U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), 2009).

Específicamente, para el desarrollo de esta Tesis, se trabajó con una interfaz gráfica de CALPUFF, llamado *CALPUFF View*, que permite un uso expedito del sistema de modelación por parte del usuario; a continuación se presentan los antecedentes y la visión general del sistema de modelación CALPUFF, obtenidos del manual del usuario del programa (Scire et al., 2000).

3.1.1. Antecedentes

El sistema de modelación CALPUFF, que incluye el modelo de dispersión CALPUFF, el modelo meteorológico CALMET y otros modelos y programas relacionados, fue creado por la *Sigma Research Corporation* (hoy parte de *Earth Tech, Inc.*) como parte de un proyecto para diseñar y desarrollar un sistema de modelación generalizado de calidad del aire en estado no estacionario, para uso regulatorio.

Para el diseño inicial del sistema se exigía que éste contara con las siguientes características de funcionamiento:

- Incluir fuentes puntuales y de área variables en el tiempo.
- Modelar dominios tanto a decenas como a cientos de kilómetros de una fuente.

- Realizar simulaciones para periodos de tiempo desde una hora a un año.
- Aplicarse tanto a contaminantes inertes como a los sujetos a remoción lineal y mecanismos de conversión química.
- Aplicarse a terrenos complejos o irregulares.

El sistema de modelación desarrollado para cumplir con estos objetivos fue constituido por 3 componentes:

- i) Un paquete de modelación meteorológica con generadores de campos de viento, tanto de diagnóstico como de pronóstico (CALMET).
- ii) Un modelo de dispersión de *puffs* con remoción química, depositación húmeda y seca, algoritmos para terrenos complejos, posibilidad de considerar efectos de edificios, fumigación de la pluma y otros efectos (CALPUFF).
- iii) Programas para procesamiento posterior de los outputs de información meteorológica, concentraciones y flujos de depositación (CALPOST).

3.1.2. Visión general

El sistema de modelación CALPUFF está compuesto por tres módulos principales: CALMET, CALPUFF, y CALPOST junto a varios programas diseñados para pre-procesar la información meteorológica y geofísica a ingresar al programa.

En términos simples, CALMET corresponde a un modelo meteorológico que genera un archivo con campos horarios de viento y temperatura en un dominio de

modelación de grilla tridimensional, además de campos bidimensionales como el de la altura de mezclado, las características de la superficie (usos del suelo) y las propiedades de dispersión. Este archivo generado es utilizado por CALPUFF como archivo de entrada de información meteorológica que éste requiere para funcionar.

CALPUFF por su parte, corresponde a un modelo Gaussiano Lagrangiano de transporte y dispersión que sigue la trayectoria en estado no estacionario de *puffs* de contaminantes emitidos por las fuentes modeladas, simulando su dispersión y procesos de transformación a lo largo de su trayectoria. Las variaciones temporales y espaciales en los campos meteorológicos seleccionados se incorporan explícitamente en la distribución de *puffs* resultante durante el periodo simulado. Los principales archivos generados por CALPUFF entregan las concentraciones horarias obtenidas en los receptores definidos en la simulación.

Por último, CALPOST es utilizado para procesar los archivos generados, tanto por CALPUFF como por CALMET, y generar tabulaciones que resumen los resultados de la simulación como concentraciones medias y flujos de depositación.

Cada uno de estos componentes posee una interfaz gráfica que permite al usuario utilizar el programa de una manera más amigable para: preparar el archivo de control que configura la simulación; ejecutar el modelo del componente correspondiente; y conducir las funciones de manejo de archivos.

Además de CALMET, CALPUFF, CALPOST y sus correspondientes interfaces, el sistema de modelación interactúa con otros modelos. La Figura III.1 muestra la configuración global del sistema de modelación, donde cuatro de los modelos mostrados corresponden a modelos externos a CALPUFF.

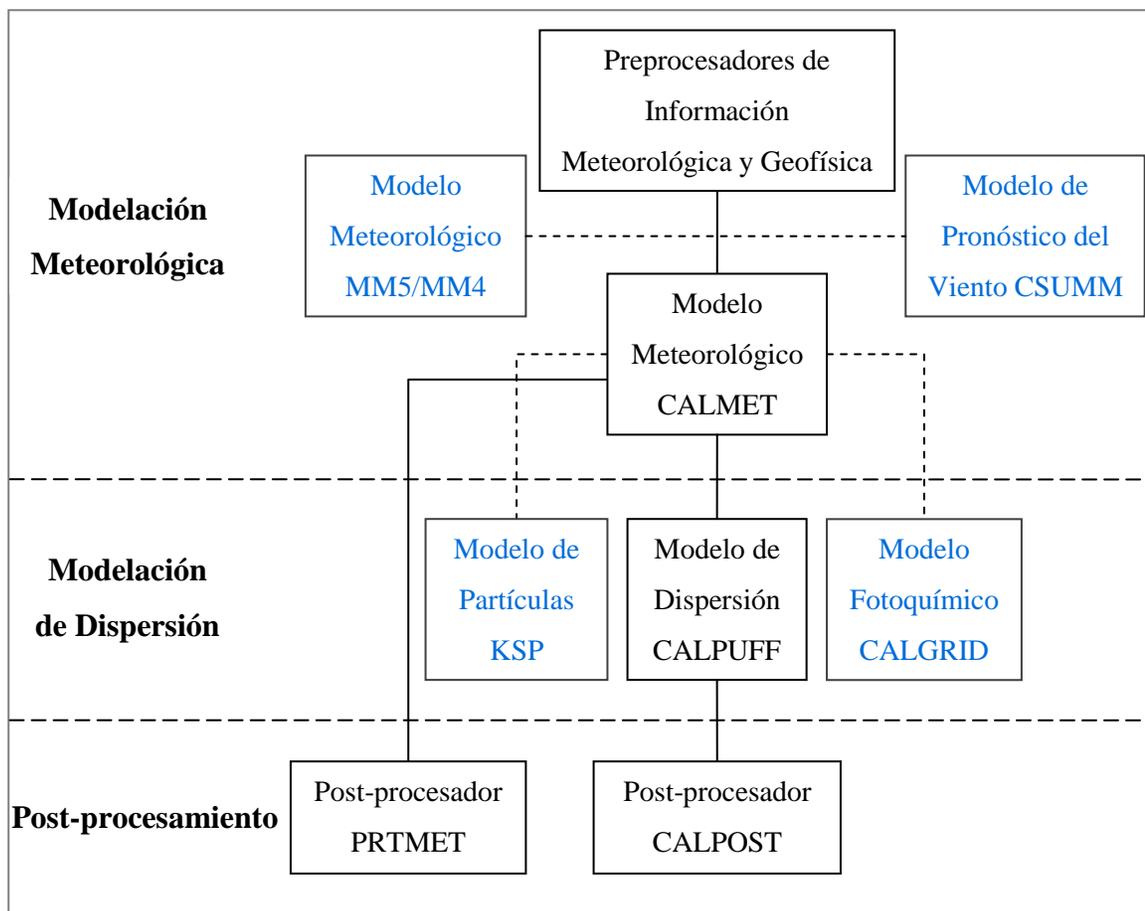


Figura III.1: Esquema de la configuración del sistema de modelación CALPUFF. En negro: componentes internos de CALPUFF y en gris: modelos externos que interactúan con los de CALPUFF.
Fuente: Scire et al. (2000).

Cada uno de los cuatro modelos externos a CALPUFF posee su propia interfaz gráfica para generar o leer archivos de información meteorológica. Los archivos generados por ambos modelos meteorológicos externos pueden ser utilizados por CALMET luego de ser transformados, por otros programas, a archivos en formato compatible con CALMET, mientras que los modelos de dispersión externos pueden utilizar los archivos generados por CALMET para generar su meteorología.

Por último, PRTMET corresponde a un post-procesador de la información meteorológica generada por el modelo CALMET, que despliega la parte de la información meteorológica que el usuario le solicite.

3.1.3. Modelo meteorológico CALMET

Con respecto al modelo meteorológico utilizado por CALPUFF, llamado CALMET, a continuación se presenta la información técnica que puede ser encontrada en su respectivo manual de usuario (Fernau et al., 2000).

a) Descripción técnica

El modelo CALMET usa un sistema de grillas formado por N_Z capas de N_X por N_Y celdas cuadradas horizontales. Al centro de cada uno de los cubos generados por esta grilla se les llama punto de grilla, y a los límites verticales u horizontales entre los cubos se les llama caras de la respectiva celda. En CALMET, las dos componentes horizontales del viento (u y v) se encuentran definidas en cada uno de los puntos de la grilla, mientras que la componente vertical (w) se encuentra definida en las caras verticales de las celdas, obteniéndose así el campo de vientos tridimensional que requiere CALPUFF para simular la dispersión de los contaminantes emitidos dentro del dominio de simulación.

b) Algoritmos principales del modelo y opciones

El modelo meteorológico CALMET está compuesto por un modelo de generación de campos de viento de diagnóstico y dos modelos micro-meteorológicos para capas límite sobre agua y tierra, respectivamente.

El modelo de generación de campos de viento de diagnóstico de CALMET usa un procedimiento de dos pasos en el procesamiento de los campos de viento:

i) Paso 1: Se ajusta el campo de vientos de prueba elegido como inicial, para obtener el campo de vientos del Paso 1, considerando:

- Efectos cinemáticos del terreno.
- Efectos debidos a las pendientes del terreno.
- Efectos por bloqueo producidos por singularidades del terreno.
- Minimización de la divergencia del campo de vientos, conservando la masa de los contaminantes emitidos.

ii) Paso 2: Se realiza un procedimiento de análisis objetivo, por medio de la introducción de las observaciones superficiales disponibles al campo de vientos del Paso 1 para su corrección, obteniéndose así el campo de vientos del Paso 2 y final, a través de:

- Interpolación usando las observaciones superficiales y los valores definidos por el campo de vientos del Paso 1.
- Correcciones para reducir discontinuidades en el campo de vientos.

- Extrapolación de las velocidades de superficie y en altura para ajustar las velocidades verticales.
- Minimización de la divergencia del campo de vientos.

En caso que se desee utilizar un campo de vientos de pronóstico generado por alguno de los modelos meteorológicos externos a CALPUFF, éste se puede ingresar a CALMET de tres formas:

- Como campo de vientos de prueba inicial.
- Como campo de vientos del Paso 1.
- Como datos observados.

Por último, los modelos micro-meteorológicos de CALMET para capas límite, se basan en diferentes conocimientos, dependiendo si corresponde a celdas sobre agua o tierra, como son:

- Los parámetros de calor superficial y flujos de momento.
- Campo de temperaturas tridimensional.
- Interpolación de precipitaciones.

c) Requerimientos y generación de información

CALMET se encuentra diseñado de forma que sólo requiera de observaciones meteorológicas, ya sean de superficie o en altura, además de la información geofísica del dominio de simulación.

El modelo meteorológico utiliza observaciones de superficie, registradas en formato horario, de: velocidad y dirección del viento; temperatura; cobertura y altura de techo de nubes; presión; humedad relativa; y precipitaciones. Por su parte, la información en altura requerida por CALMET corresponde a dos observaciones diarias de perfiles verticales de velocidad y dirección del viento; y de temperatura y presión. Ambos tipos de información pueden ingresarse a CALMET ya sea en el formato estándar del programa, o en formato de archivo de texto.

En caso de que haya información en altura faltante, ya sea de velocidad o dirección del viento, o temperatura, CALMET interpola usando los datos existentes para reemplazar la información faltante. Sin embargo CALMET no puede extrapolar, por lo que tanto el valor superior como el inferior deben estar siempre presentes.

Además de las observaciones de superficie y en altura, CALMET requiere información geofísica en formato de campos grillados que consideren, al menos, las elevaciones del terreno y las categorías de uso de suelo. Como información opcional también podría recibir campos con: la rugosidad superficial; el albedo; la razón de Bowen; entre otros, sin embargo, en caso de que ésta no se ingresara directamente por el usuario, CALMET la estima con valores por defecto que posee en función del uso de suelos del dominio de modelación.

CALMET lee la información ingresada por el usuario desde un archivo de control, llamado CALMET.INP, que contiene las opciones del modelo que el usuario seleccionó, las variables ingresadas, las opciones de salida y los nombres de archivos a utilizar, entre otros. El principal archivo generado por CALMET corresponde a

CALMET.DAT, que contiene la información meteorológica, en grillas horarias, que fue procesada por el modelo; los campos de viento y temperatura tridimensionales generados; además de la información geofísica, como alturas del terreno y uso de suelo.

3.1.4. Modelo de dispersión CALPUFF

Con respecto al modelo de dispersión CALPUFF, a continuación se presenta la información técnica relevante de su estructura y funcionamiento, que puede ser encontrada en su respectivo manual de usuario (Scire et al., 2000).

a) Descripción técnica

Como se mencionó anteriormente, CALPUFF corresponde a un modelo Gaussiano Lagrangiano de dispersión de *puffs* en estado no estacionario que puede analizar varias capas y contaminantes simultáneamente, simulando el efecto de condiciones meteorológicas cambiantes, tanto en el tiempo como en el espacio, sobre el transporte de contaminantes, su transformación y remoción. CALPUFF recibe como archivos de entrada los campos meteorológicos tridimensionales generados con CALMET.

b) Algoritmos principales del modelo

CALPUFF posee algoritmos tanto para simular efectos causados por la cercanía a las fuentes de emisión, como fumigación de la pluma, penetración parcial de la pluma a través de una inversión térmica, interacciones complejas con el terreno a nivel de sub-grilla, entre otros, como para efectos de mayor impacto, como depositación

seca y húmeda; transformaciones químicas; estructura de los vientos verticales; efectos de terrenos complejos; transporte sobre el agua y efectos de interacción con la costa, aspectos que le permiten abarcar un gran rango de circunstancias meteorológicas a ser modeladas.

c) Requerimientos y generación de información

CALPUFF lee las opciones ingresadas por el usuario desde un archivo de control, llamado CALPUFF.INP. Este archivo contiene las selecciones realizadas por el usuario de las variadas opciones del modelo, variables técnicas de entrada, opciones de datos de salida, y otras opciones que son controlables por el usuario.

CALPUFF requiere además de la información meteorológica procesada previamente por CALMET, y que se encuentra disponible en el archivo CALMET.DAT que servirá de archivo de entrada para CALPUFF. Este archivo contiene información en campos grillados de: las componentes de la velocidad del viento u , v y w (en 3-D); la dirección del viento; la temperatura del aire (en 3-D), la velocidad de fricción de superficie; la altura de mezclado (z_i), las clases de estabilidad; y precipitaciones, entre otras, además de la información geofísica ingresada, también en campos grillados, con información necesaria de: las elevaciones del terreno; las categorías de uso de suelos; y la rugosidad superficial.

Por otro lado, CALPUFF requiere para la simulación, la información correspondiente a las fuentes de emisión ubicadas dentro del dominio, correspondiendo esto a las características tanto de la fuente como de las emisiones de ésta. Específicamente se requiere indicar a qué categoría corresponde la fuente (puntual, de área, de volumen o de línea), y qué tipo de emisión realiza (constante o variable). Toda esta información también es ingresada a CALPUFF por medio del archivo CALPUFF.INP.

Por último, también se pueden ingresar a CALPUFF archivos que contengan información de: la velocidad de depositación de cada contaminante (opcional); las mediciones horarias de ozono; las tasas de transformación química; las elevaciones y alturas del terreno; y la configuración de los receptores; entre otros.

Los principales archivos generados por CALPUFF, donde se presentan los resultados de la simulación, corresponden a:

- CALPUFF.LST: Contiene una impresión de los datos de entrada del modelo; los campos de concentraciones obtenidos en los receptores de grilla o discretos; los flujos de depositación seca y húmeda; e información adicional de la simulación.
- CONC.DAT: Corresponde al archivo que contiene las concentraciones medias horarias simuladas en receptores tipo grilla o discretos, para los contaminantes seleccionados por el usuario en el archivo de control.

d) Ecuaciones en el modelo CALPUFF

Los modelos utilizados por CALPUFF corresponden, como se mencionó anteriormente, a modelos de *puffs*. A grandes rasgos, dichos modelos representan una pluma de emisiones continua, como un número de paquetes discretos de contaminantes.

La mayor parte de los modelos de *puffs* evalúan la contribución de un *puff* a la concentración en un receptor, por medio de un acercamiento instantáneo, donde cada uno de los *puffs* se encuentra como congelado en intervalos particulares de tiempo, llamados etapas de muestreo. La concentración debida a ese *puff* congelado en ese tiempo es procesada, o muestreada, y sólo después de esto el *puff* puede volver a moverse, cambiando de tamaño, velocidad, edad, etc., hasta la siguiente etapa de muestreo. La concentración total en un receptor corresponde a la suma de las

contribuciones de todos los *puffs* cercanos promediados para todas las etapas de muestreo dentro de la etapa de tiempo básica.

CALPUFF puede utilizar dos alternativas a la función de muestreo convencional; la primera usa *puffs* Gaussianos de radio simétrico, mientras que la segunda usa *puffs* no circulares llamados *slugs*, alargados en la dirección que tenía el viento al momento de la emisión. CALPUFF permite utilizar cualquiera de estos dos esquemas de muestreo, sin embargo, también se puede realizar una simulación híbrida, si el usuario lo desea, que aprovecha los beneficios de ambos algoritmos.

Las ecuaciones básicas para representar la contribución de un *puff* en un receptor se presentan en las Ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (3.1)$$

$$g = \frac{2}{2\pi^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{H_e + 2nh^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (3.2)$$

Donde;

C: Concentración del contaminante a nivel del suelo (g/m^3).

Q: Masa de contaminante (g) en el *puff*.

σ_x : Desviación estándar (m) de la distribución Gaussiana en la dirección del viento.

σ_y : Desviación estándar (m) de la distribución Gaussiana en la dirección perpendicular al viento.

σ_z : Desviación estándar (m) de la distribución Gaussiana en la dirección vertical.

d_a : Distancia (m) desde el centro del *puff* al receptor, en la dirección del viento.

d_c : Distancia (m) desde el centro del *puff* al receptor, en la dirección perpendicular al viento.

g : Término vertical (m) de la ecuación Gaussiana.

H : Altura efectiva (m) del centro del *puff* sobre el suelo.

h : Altura de mezclado (m).

3.1.5. Análisis estadístico

Para evaluar el modelo de dispersión y determinar si los resultados obtenidos de la simulación computacional (concentraciones simuladas) representan correctamente a los observados (concentraciones monitoreadas), existen diferentes indicadores estadísticos. En la presente Tesis se utilizaron los indicadores estadísticos que permiten comparar ambas series de tiempo, datos observados y simulados, presentados en el artículo de Jorquera y Castro (2010) y que han sido recomendados por la EPA de EEUU.

a) Definiciones previas

- n : Cantidad de datos de concentración con los que se cuenta, para los datos observados y simulados.
- O_i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): Concentración promedio diaria observada.

- S_i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): Concentración promedio diaria simulada por el sistema de modelación.

b) Indicadores estadísticos

- Concentración media observada (\bar{O}) y simulada (\bar{S}):

$$\bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

Fundamentalmente, se espera que el valor medio observado sea lo más parecido posible al simulado.

- Desviaciones estándar de lo observado (σ_o) y de lo simulado (σ_s):

$$\sigma_o = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n O_i - \bar{O}^2 \right)^{0,5}$$

$$\sigma_s = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n S_i - \bar{S}^2 \right)^{0,5}$$

- Concentración media del residual (SESGO):

$$\text{SESGO} = \bar{O} - \bar{S}$$

- Diferencia media normalizada (DMN):

$$\text{DMN} = \frac{\bar{O} - \bar{S}}{\bar{O}}$$

La EPA (1986) ha definido que un modelo se considera deficiente si la diferencia media normalizada es superior a 50%. Este amplio rango de variación tolerado se debe a la incertidumbre propia de todo modelo de dispersión, ya que, por muy preciso que sea el modelo, siempre existirán desviaciones de las concentraciones observadas producidas por variables desconocidas involucradas en cada evento, especialmente si se comparan datos horarios, por ejemplo.

- Error cuadrático medio (ECM):

$$\text{ECM} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - S_i^2 \right)^{0.5}$$

Tanto este indicador como el anterior deben ser lo más pequeños posibles para considerarse que el modelo predice bien a las observaciones.

- Error cuadrático medio sistemático (ECM_s) y no sistemático (ECM_{ns}):

$$ECM_s = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - \hat{S}_i \right)^2$$

$$ECM_{ns} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{S}_i - S_i \right)^2$$

Donde $\hat{S}_i = a + bO_i$, siendo a el intercepto y b la pendiente de la regresión lineal de mínimos cuadrados entre las concentraciones observadas y las simuladas.

- Coeficiente de correlación (Corr):

$$\text{Corr} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} \quad S_i - \bar{S}}{\sigma_o \sigma_s}$$

- Índice de evaluación (IE):

$$IE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n O_i - S_i \quad ^2}{\sum_{i=1}^n |S_i'| + |O_i'| \quad ^2}$$

Donde $S_i' = S_i - \bar{O}$ y $O_i' = O_i - \bar{O}$.

El índice de evaluación puede tomar valores entre cero y uno, donde uno corresponde a una perfecta concordancia de las concentraciones simuladas con las observadas y cero a una concordancia deficiente entre dichos valores (Robeson y Steyn, 1990).

3.2. Modelación inversa, mediante filtro de Kalman

El método elegido para corregir el inventario de emisiones disponible correspondió a la llamada modelación inversa, específicamente al filtro de Kalman, cuyo marco teórico se presenta a continuación, basado en un artículo escrito por Jacob en 2007.

En términos generales, la modelación inversa corresponde a un procedimiento o algoritmo formal para estimar las variables que controlan la evolución de un sistema dinámico, por medio de la toma de mediciones de las manifestaciones observables de ese sistema, y del uso de la comprensión física para relacionar esas observaciones con las variables que controlan el sistema.

Las variables que se desean estimar son llamadas variables de estado y son representadas por un vector de estado \mathbf{x} . Las observaciones por su parte, son representadas por un vector de observaciones \mathbf{y} . Por último, la relación entre \mathbf{x} e \mathbf{y} queda descrita por un modelo físico \mathbf{F} , llamado el modelo *forward* o directo. Esta relación entre las variables queda descrita en la Ecuación (3.3):

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Donde \mathbf{b} es un vector que contiene los parámetros del modelo que no se buscan optimizar y se mantienen fijos en este análisis, y $\boldsymbol{\varepsilon}$ un vector de errores

observados, que incluye las contribuciones de los errores en las observaciones; en los algoritmos y en los parámetros del modelo directo.

Para realizar una modelación inversa exitosa se requiere que el error sea caracterizado adecuadamente y que se considere la información a priori de \mathbf{x} con la que se contaba, \mathbf{x}_a , que posee a su vez un error propio expresado en la Ecuación (3.4).

$$\mathbf{X}_a = \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}_a \quad (3.4)$$

Invirtiendo la Ecuación (3.3) se puede obtener \mathbf{x} a partir de un vector \mathbf{y} de observaciones determinado, sin embargo, en general la inversión del modelo directo es un procedimiento recursivo, ya que \mathbf{F} puede ser una función no lineal. En caso de que existiera error ($\varepsilon \neq 0$), el vector de estado \mathbf{x} puede ser determinado sólo como una estimación estadística, y se debe comparar la información resultante con el conocimiento del vector de estado \mathbf{x}_a con el que se contaba antes de que las observaciones fueran realizadas. La solución óptima de \mathbf{x} reflejando este conjunto de restricciones es llamada estimación a posteriori óptima.

La elección del vector de estado, es decir, qué variables incluir en \mathbf{x} o en \mathbf{b} , depende de qué variables se deseen optimizar, de la información contenida en las observaciones, y de los costos computacionales asociados a la realización de la modelación inversa.

La modelación inversa tiene tres aplicaciones importantes en la química atmosférica:

- i) Obtención de perfiles de concentraciones ambientales a partir de observaciones satelitales de propiedades espectroscópicas de la atmósfera.

- ii) Estimación óptima de flujos de superficie.
- iii) Asimilación de información química en tres dimensiones.

La aplicación de la modelación inversa en esta Tesis se orienta específicamente al punto ii), es decir, a la estimación óptima de los flujos de superficie o, lo que es equivalente a la estimación de las emisiones de algún contaminante. Los flujos en dicha superficie representan el vector de estado \mathbf{x} , mientras que el vector de observaciones \mathbf{y} se encuentra conformado por las concentraciones atmosféricas observadas del contaminante en una red de sitios.

El modelo directo es un modelo de transporte químico o de dispersión que relaciona \mathbf{x} con \mathbf{y} . El vector de parámetros \mathbf{b} incluye tanto las variables meteorológicas como cualquier característica del flujo de superficie que esté simulada en el modelo de transporte químico, pero no incluida en el vector de estado.

La información de las observaciones en \mathbf{y} es llamada una restricción *top-down* en los flujos de superficie, mientras que a la información a priori en \mathbf{x} , que está basada en el conocimiento de los procesos que determinan los flujos, se le llama restricción *bottom-up*. La combinación de ambas restricciones permite obtener la estimación óptima de \mathbf{x} .

3.2.1. Modelación inversa matricial

Jacob (2007) plantea que se puede obtener una estimación óptima de un vector de estado \mathbf{x} (de dimensión n) en base a: el vector de observaciones \mathbf{y} (de dimensión m); el valor de \mathbf{x} a priori (\mathbf{x}_a); el modelo directo \mathbf{F} ; y las matrices de covarianza del error \mathbf{S}_a y \mathbf{S}_e , aplicando el teorema de Bayes. Para ello plantea que se debe previamente linealizar el modelo directo, en caso de que éste no lo sea, para poder usar álgebra matricial.

La linealización del modelo directo $y = F(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \varepsilon$ se hace realizando una expansión de Taylor en torno a la estimación a priori de \mathbf{x} (\mathbf{x}_a), como primera aproximación, según lo describe la Ecuación (3.5).

$$y = F(\mathbf{x}_a, \mathbf{b}) + \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + O((\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^2) \quad (3.5)$$

Donde, como establecen Jorquera y Castro (2010), $\mathbf{K} = \partial y / \partial \mathbf{x}$ representa la sensibilidad de las variables observadas \mathbf{y} frente a las variables de estado \mathbf{x} . Específicamente, la matriz \mathbf{K} corresponde al Jacobiano, o linealización, del modelo directo, con elementos $k_{ij} = \partial y_i / \partial x_j$, que permite la aplicación de álgebra matricial para resolver el problema de modelación inversa. Si el modelo directo es lineal, \mathbf{K} no varía con \mathbf{x} , si no lo es, entonces debe ser evaluado inicialmente para $\mathbf{x} = \mathbf{x}_a$ y recalculado iterativamente a medida que la inversión sigue. Asumiendo que el modelo directo es lineal, o ya ha sido linealizado, la Ecuación (3.3) se escribe de la forma de la Ecuación (3.6).

$$\mathbf{y} = \mathbf{K}\mathbf{x} + \varepsilon \quad (3.6)$$

La solución óptima para \mathbf{x} está dada por la máxima probabilidad de obtener un valor de \mathbf{x} , dado un valor de \mathbf{y} , es decir, por el máximo valor de $P(\mathbf{x} | \mathbf{y})$. Esta solución óptima también es llamada solución analítica máxima a posteriori (solución analítica MAP) y es equivalentemente al valor escalar mínimo de la función de costo mostrada en la Ecuación (3.7).

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + (\mathbf{y} - \mathbf{K}\mathbf{x})^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K}\mathbf{x}) \quad (3.7)$$

Para encontrar este valor mínimo se resuelve para $\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x}) = 0$, resultando la Ecuación (3.8).

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x}) = 2\mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + 2\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} (\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{y}) = 0 \quad (3.8)$$

Cuya solución es directa y puede expresarse en forma compacta como la Ecuación (3.9).

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + \mathbf{G}(\mathbf{y} - \mathbf{K}\mathbf{x}_a) \quad (3.9)$$

Donde \mathbf{G} corresponde a la matriz de ganancia, mostrada en la Ecuación (3.10).

$$\mathbf{G} = \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1} \quad \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \quad (3.10)$$

Y que describe la sensibilidad de la solución MAP con respecto a las observaciones, es decir, $\mathbf{G} = \partial \hat{\mathbf{x}} / \partial \mathbf{y}$.

La matriz de covarianza del error de $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{S}}$, se puede expresar como muestra la Ecuación (3.11).

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1} \quad (3.11)$$

3.2.2. Filtro de Kalman

La modelación inversa hasta ahora explicada sólo ha considerado la construcción de un vector de estado de valor fijo en base a las observaciones. Sin embargo, en lo que concierne a esta Tesis, se desean utilizar valores de observaciones distribuidas en el tiempo para construir un vector de estado que evoluciona en el tiempo, sujeto a alguna información a priori de este vector de estado y de su evolución en el tiempo; y no resolviéndolo para todos los tiempos de una vez. Una manera directa de realizar esto es utilizar el método del filtro de Kalman, o de asimilación de datos 3-D, explicado a continuación en base al artículo de Jacob (2007).

El filtro de Kalman es un procedimiento que consiste en iterar en el tiempo el cálculo de la solución óptima analítica para el vector de estado \mathbf{x} (solución analítica MAP), que, como se mencionó anteriormente, maximiza el valor de $P(\mathbf{x} | \mathbf{y})$.

El nombre de “método de variables 3-D” se refiere al uso de observaciones en un momento determinado de tiempo para forzar al vector de estado a ese momento, sujeto a información disponible a priori, correspondiente a tiempos previos o posteriores.

El filtro de Kalman puede correrse hacia delante o hacia atrás (*forward* o *backward*), sin embargo, en esta Tesis sólo se utilizó el método hacia delante.

El filtro de Kalman hacia delante considera: un conjunto de observaciones registradas en tiempos discretos en un intervalo de tiempo, es decir, un conjunto de observaciones \mathbf{y}_t registradas en tiempos \mathbf{t} ; y el valor correspondiente del vector de estado \mathbf{x}_t .

Comenzando a partir del conocimiento a priori, $\mathbf{x}_a, \mathbf{S}_a$ en el tiempo inicial 0, se usan las observaciones \mathbf{y}_0 y la solución analítica MAP para deducir las mejores estimaciones de $\hat{\mathbf{x}}_0, \hat{\mathbf{S}}_0$ para ese tiempo. Entonces, se avanza progresivamente en el tiempo con el cálculo de los vectores de estado \mathbf{x}_{at} , usando conocimientos a priori de la evolución de \mathbf{x} en el tiempo, expresado por un operador lineal de evolución \mathbf{M}_t (o linealizado) con un error $\boldsymbol{\varepsilon}_M$, cuya relación se presenta en la Ecuación (3.12).

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{M}_t \mathbf{x}_{t-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_M \quad (3.12)$$

En el caso más simple, si \mathbf{x} mantuviera su valor en el tiempo, \mathbf{M}_t correspondería a la matriz identidad.

Considerando un tiempo (t-1) para el cual se tiene la solución analítica MAP $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}, \hat{\mathbf{S}}_{t-1}$, se usa la Ecuación (3.12) para obtener un valor a priori para \mathbf{x}_t de la forma $\mathbf{x}_{at} = \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1}$, con su matriz de covarianza del error a priori asociada, expresada en la Ecuación (3.13).

$$\mathbf{S}_{at} = E[\mathbf{M}_t \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{M}_t^T] + E[\boldsymbol{\varepsilon}_M \boldsymbol{\varepsilon}_M^T] = \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{S}}_{t-1} \mathbf{M}_t^T + \mathbf{S}_{\xi t} \quad (3.13)$$

Donde $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ es el error de \mathbf{x}_{t-1} y \mathbf{S}_M es la matriz de covarianza del error del operador de evolución. De esta forma se obtienen las soluciones analíticas MAP para \mathbf{x}_t dependientes del tiempo para todo el intervalo.

3.2.3. Aplicación del filtro de Kalman en contaminación atmosférica

La modelación inversa, específicamente el filtro de Kalman, puede utilizarse en contaminación atmosférica para corregir inventarios de emisiones, tal como es el caso de la presente Tesis, donde se desarrolló el filtro usando la metodología presentada en el artículo de Jorquera y Castro (2010).

Para comprender inicialmente la aplicación de la modelación inversa en la presente Tesis a continuación se definen, en función de variables relacionadas a la contaminación atmosférica, las principales matrices y vectores involucrados en el método, es decir, las que se encuentran presentes en la Ecuación (3.3), siendo éstas definidas de la siguiente manera:

- **y**: Vector de concentraciones observadas del contaminante estudiado en el punto donde se está evaluando su valor.
- **x**: Vector de emisiones del contaminante estudiado que ocurren en el área de influencia del punto donde se están evaluando los efectos de la contaminación.
- **F**: Modelo directo, en este caso corresponde al modelo de transporte que relaciona las emisiones con las concentraciones.
- **b**: Vector que contiene los parámetros del modelo, considerados fijos en esta Tesis.
- **ε**: Vector de errores que considera la contribución de los errores de las concentraciones observadas; del modelo directo linealizado; y de los parámetros del modelo directo.

Como se mencionó anteriormente, tomando las observaciones de \mathbf{y} , se usa un vector de emisiones a priori \mathbf{X}_a para calcular un óptimo $\hat{\mathbf{y}}$, aplicando un análisis Bayesiano, obtener un vector a posteriori óptimo $\hat{\mathbf{X}}$.

En las aplicaciones atmosféricas de la modelación inversa, el modelo directo \mathbf{F} , su Jacobiano y las emisiones \mathbf{x} son dependientes del tiempo, por ello, la dinámica del estado \mathbf{x} debe ser descrita por la ecuación de evolución mostrada en la Ecuación (3.14):

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{M}_t \mathbf{x}_{t-1} + \xi_t \quad (3.14)$$

Donde \mathbf{M}_t es una matriz conocida que representa la evolución general de \mathbf{x} en el tiempo, y ξ_t es un vector aleatorio que representa variaciones de la variable de estado que podrían no estar totalmente consideradas en la modelación, como la distribución espacial y temporal de emisiones de fuentes de área, que típicamente representan incertidumbres en inventarios de emisiones. En general, se supone que a partir del inventario inicial (a priori) es posible tener un modelo predictivo de cómo van a evolucionar las emisiones en el tiempo.

Combinando las ecuaciones (3.3) y (3.14), se obtiene la versión lineal del problema de estimación mostrado en las Ecuaciones (3.15).

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t &= \mathbf{M}_t \mathbf{x}_{t-1} + \xi_t \\ \mathbf{y}_t &= \mathbf{K}_t \mathbf{x}_t + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3.15)$$

Donde ε_t , el error observado, se encuentra representado por la Ecuación (3.16).

$$\varepsilon_t = \sigma_R y_t + \sigma_0 \quad (3.16)$$

Donde σ_R corresponde a la componente relativa del error, específicamente al porcentaje en que las concentraciones simuladas son mayores o menores que las observadas, y σ_0 corresponde a la componente del error debida a la resolución de los instrumentos utilizados en el monitoreo ambiental.

El algoritmo utilizado para encontrar la solución óptima de \mathbf{x} (solución analítica MAP) para cada día de la simulación, por medio del filtro de Kalman, considera dos etapas:

i) Cálculo a priori de las emisiones \mathbf{X}_{at} :

Donde se calcula el vector de estado a priori \mathbf{X}_{at} , correspondiente a las emisiones a priori del día de simulación t , y su asociada matriz de covarianza del error en el intervalo de tiempo t , usando los resultados a posteriori del intervalo de tiempo anterior. De esta forma se trabaja con un algoritmo recursivo expresado en la Ecuación (3.17).

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{at} &= \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1} \\ \mathbf{S}_{at} &= \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{S}}_{t-1} \mathbf{M}_t^T + \mathbf{S}_{\xi t} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Donde \hat{S}_{t-1} y S_{at} son las matrices de covarianza del error de \hat{x}_{t-1} y x_{at} respectivamente.

ii) Cálculo a posteriori de las emisiones óptimas \hat{x}_t :

Corresponde a la etapa de cálculo de las emisiones óptimas o corregidas \hat{x}_t del día t de simulación, que considera varios cálculos de variables previos para finalmente resolver la Ecuación (3.18) para encontrar el óptimo.

$$\hat{x}_t = x_{at} + G_t (y_t - y_{sim t}) \quad (3.18)$$

Donde $y_{sim t} = K_t \times x_{at}$ corresponde al vector de concentraciones simuladas que se obtienen en los receptores como producto de las emisiones de cada grupo emisor.

De esta forma finalmente se obtiene el valor de la emisión corregida para el día t , que se utilizará para estimar la emisión a priori del día siguiente con la primera Ecuación de (3.17). Con estos pasos, iterativamente se irán encontrando los valores de las emisiones diarias óptimas para todos los días del año simulado, resolviendo las Ecuaciones (3.17) y (3.18) para cada uno de ellos.

3.3. Simulación de Monte Carlo

Con el fin de determinar qué tan robustos o exactos resultan ser los resultados obtenidos de la modelación inversa, frente a cambios en algunos de los parámetros asumidos para su resolución, se realizó una simulación de Monte Carlo.

Una simulación de Monte Carlo corresponde a una situación experimental donde se replica múltiples veces un estudio que involucra variables aleatorias. De cada una de estas réplicas se obtiene un estimador o resultado, por lo que de la simulación de Monte Carlo se obtienen múltiples estimadores que pueden diferir entre ellos por ser obtenidos con distintos procesos estocásticos, pero cuya media permite obtener un acercamiento al valor central de la cantidad que se desea estimar, y cuya distribución empírica permite dar luces del comportamiento real de éste y de la precisión de la estimación (Schmidheiny, 2009).

Una limitación de la simulación de Monte Carlo es que la precisión de la estimación obtenida depende de la cantidad de réplicas que se usaron en ésta, por lo que se sugiere realizar la mayor cantidad de réplicas que sea posible y comparar los resultados obtenidos de ella con los de simulaciones con menor número de réplicas; si éstos no cambian significativamente, se pueden utilizar los resultados obtenidos de la simulación con menor número de réplicas.

Para la presente Tesis se busca utilizar la simulación de Monte Carlo para determinar qué tan robustos son los resultados obtenidos con la modelación inversa frente a cambios en ciertos supuestos realizados para algunos de los valores de los parámetros de error utilizados en la construcción de las matrices de varianza-covarianza que requiere el filtro de Kalman para poder ejecutarse. Lo que se ha hecho en esta Tesis es asumir que dichas matrices son inicialmente diagonales y luego se procedió a asimilar los datos, con lo cual se van modificando dichas matrices a lo largo del método de cálculo.

De esta forma, la simulación de Monte Carlo corresponderá a la realización de múltiples modelaciones inversas, realizadas con distintos valores aleatorios para los parámetros de error σ_R , ξ_1 y ξ_t , de donde se obtendrán las emisiones diarias óptimas de todo el año simulado, para cada una de estas múltiples modelaciones, obteniéndose así un promedio de ensemble que representa la mejor estimación que se puede hacer de las emisiones correctas. Así se puede determinar qué tan precisos resultaban ser los

resultados obtenidos de la modelación inversa original, realizada con un conjunto de parámetros de error estimados a partir de los resultados de la simulación inicial, con el inventario base o a priori.

IV. METODOLOGÍA

La implementación específica en la presente Tesis de los tres procedimientos a utilizar para su desarrollo, descritos teóricamente en el Capítulo III, será detallada en profundidad a continuación para cada uno de ellos:

4.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF

La primera etapa de esta Tesis correspondió a la simulación de la dispersión de MP_{10} en CALPUFF para las comunas de Temuco y Padre las Casas para un año completo.

Al comenzar a crear el proyecto en CALPUFF se debió definir primero el dominio de simulación a utilizar, siendo éste elegido como un área total de $29 \times 29 \text{ km}^2$ formada por celdas de 1 km^2 , ubicada de forma tal que incluyera a la ciudad de Temuco aproximadamente en el centro, como se muestra en la Figura IV.1.

Posteriormente esta etapa requería el ingreso de variada información a CALPUFF, la que será detallada a continuación.

4.1.1. Meteorología

Los datos de meteorología ingresados al modelo meteorológico CALMET fueron facilitados por la CONAMA IX región y corresponden a datos horarios registrados durante el año 2006 en las estaciones de monitoreo disponibles en la zona.

La zona urbana de Temuco y Padre Las Casas cuenta con dos estaciones de monitoreo, cada una ubicada en su respectiva comuna y en adelante llamadas simplemente estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas.

La ubicación de dichas estaciones en la zona UTM 18S se especifica en la Tabla IV.1 en coordenadas geográficas *Easting/Northing* en datum WGS84 y se muestra en la imagen satelital del dominio de simulación en la Figura IV.1.

Tabla IV.1: Ubicación de las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas.

Estación	E (m)	N (m)
Temuco	706.735	5.708.407
Padre las Casas	708.924	5.705.703

Fuente: Elaboración propia.

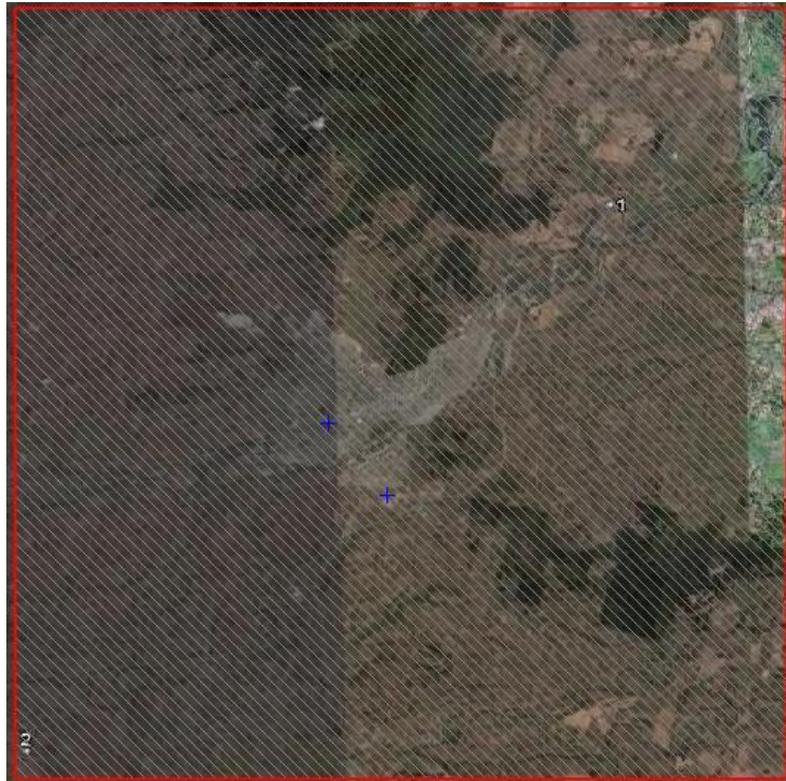


Figura IV.1: Imagen satelital de los límites del dominio de simulación utilizado (en rojo) y de las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas (en azul).

Fuente: *Google Earth*© (2009).

La información recolectada durante el año 2006 en ambas estaciones de monitoreo corresponde a:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Temperatura
- Humedad relativa

Sin embargo, en la estación de monitoreo Temuco también fueron registrados los siguientes parámetros:

- Presión
- Radiación
- Precipitación

Además, se utilizaron valores de altura y cobertura de nubes para ambas estaciones, obtenidas de la página web de la NASA “*Giovanni - MODIS Terra and Aqua Daily Level-3 Data*”².

A continuación se entregan los aspectos más relevantes de cada uno de los parámetros observados.

i) Velocidad y dirección del viento

Los datos de velocidad y dirección del viento registrados fueron ingresados al programa WRPLOT para generar las rosas de los vientos de ambas comunas para diferentes momentos del día: todo el día (de 00:00 a 23:00 hrs.); día (de 8:00 a 19:00 hrs.), noche (de 20:00 a 23:00 hrs.) y madrugada (de 00:00 a 7:00 hrs.).

En la estación de monitoreo de Temuco se observaron vientos principalmente provenientes del Suroeste, como se puede observar en la Figura IV.2, con una velocidad media de 1,71 m/s.

² National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2009). En *Giovanni - MODIS Terra and Aqua Daily Level-3 Data*. Recuperado el 14 de Abril de 2009, de http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_DAILY_L3

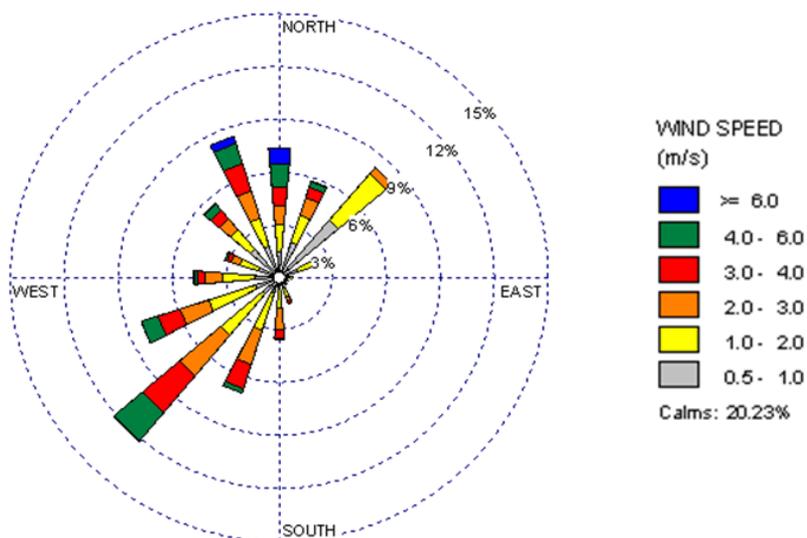


Figura IV.2: Rosa de los vientos para todo el día (de 00:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

Tal como muestran la Figura IV.3 y Figura IV.4, para el día y la noche los vientos también provienen mayoritariamente del Suroeste, sin embargo, durante la madrugada predominan los vientos provenientes del Noreste, como se puede apreciar en la Figura IV.5, introduciendo así una circulación de masas de aire casi opuesta a la que se presenta en régimen diurno y nocturno.

Los vientos más intensos se observan durante el día con una velocidad media de 2,19 m/s, donde en un 46,3% del tiempo las velocidades alcanzan valores entre 1 y 3 m/s, mientras que los más calmos se observan durante la madrugada con una velocidad media de 0,99 m/s, donde en un 69,5% del tiempo las velocidades son menores a 1 m/s.

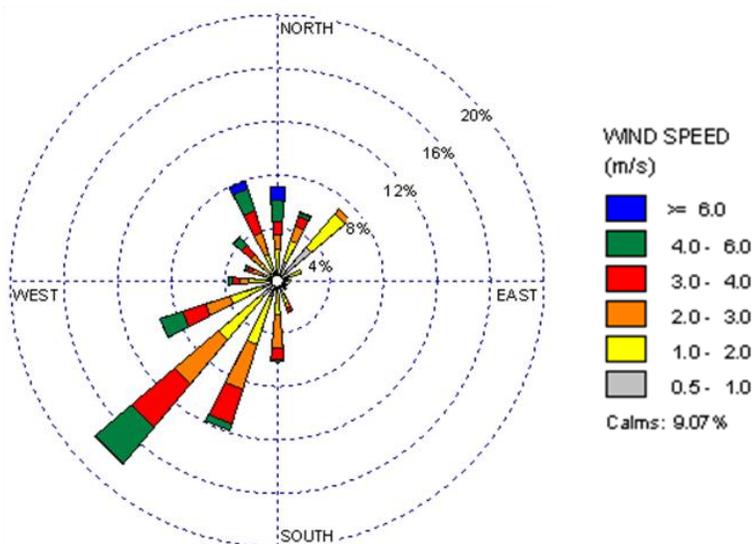


Figura IV.3: Rosa de los vientos para el día (de 08:00 a 19:00 hrs.) en la estación de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

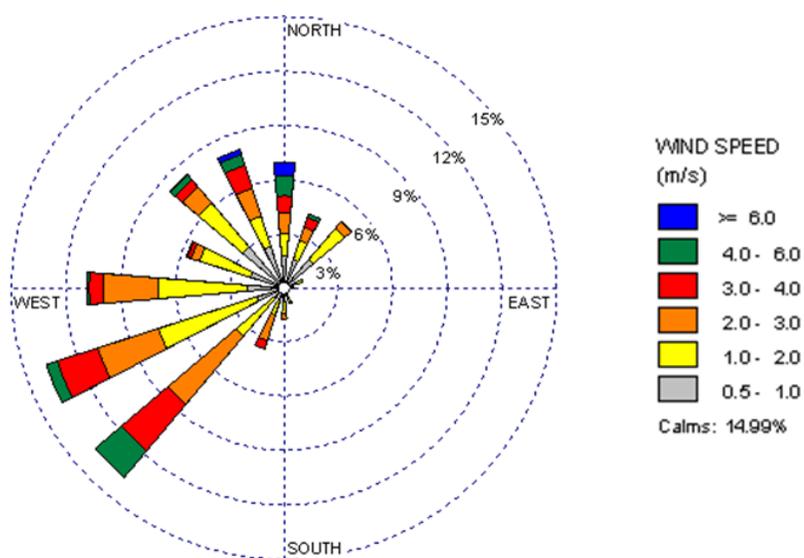


Figura IV.4: Rosa de los vientos para la noche (de 20:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

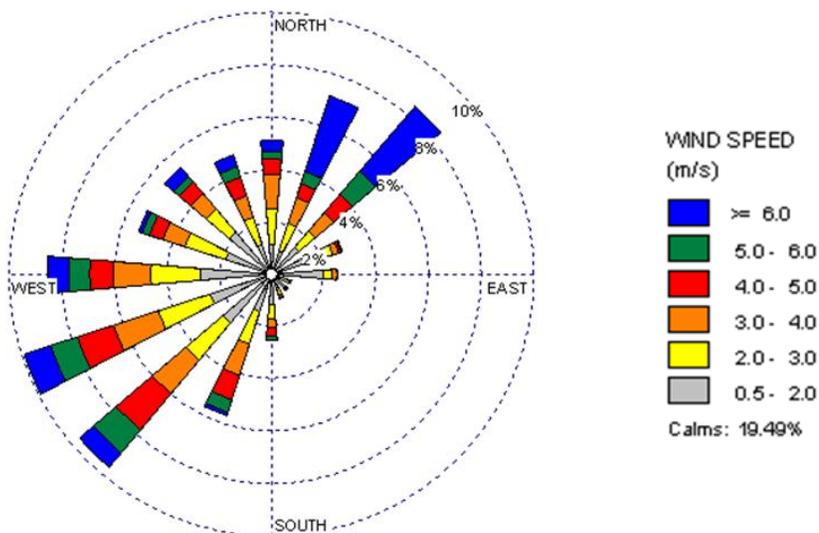


Figura IV.6: Rosa de los vientos para todo el día (de 00:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura IV.7, Figura IV.8, y Figura IV.9, en la estación de monitoreo Padre las Casas las mayores intensidades del viento se observan durante el día con una velocidad media de 3,35 m/s, donde en un 36,8% del tiempo la velocidad del viento fue mayor a 4 m/s. Los vientos más calmos por su parte se observan durante la madrugada con una velocidad media de 1,86 m/s, donde en un 33,2% del tiempo se observaron vientos calmos con velocidades menores a 0,5 m/s.

Las mayores velocidades medidas en Padre las Casas se explican porque se trata de una zona con menor cantidad de construcciones en altura, que tienden a oponerse al flujo del viento a baja altura sobre el suelo.

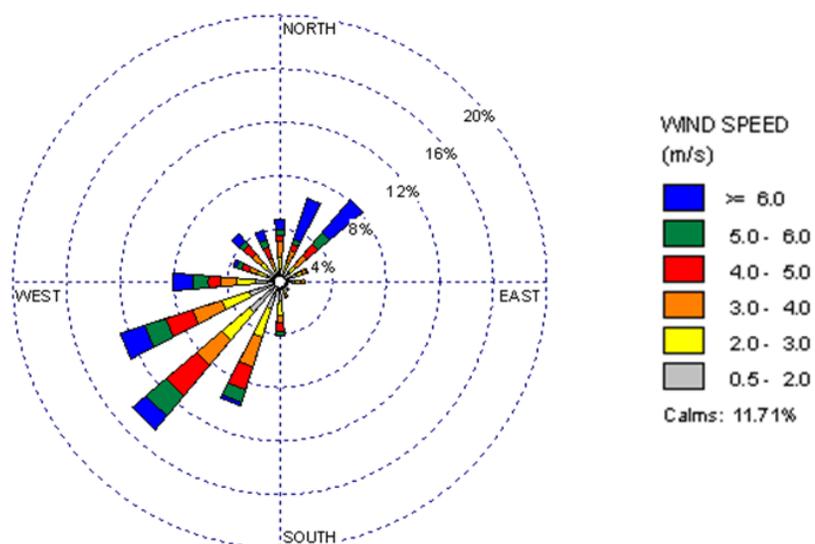


Figura IV.7: Rosa de los vientos para el día (de 08:00 a 19:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

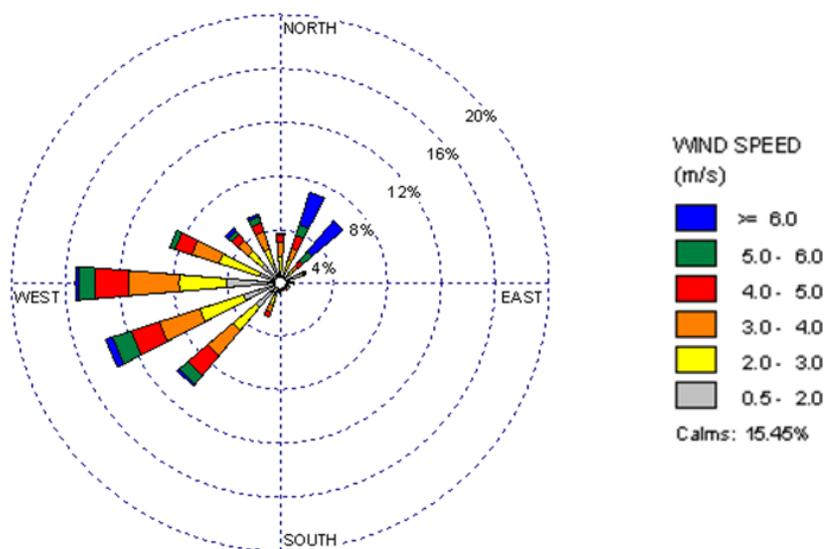


Figura IV.8: Rosa de los vientos para la noche (de 20:00 a 23:00 hrs.) en la estación de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

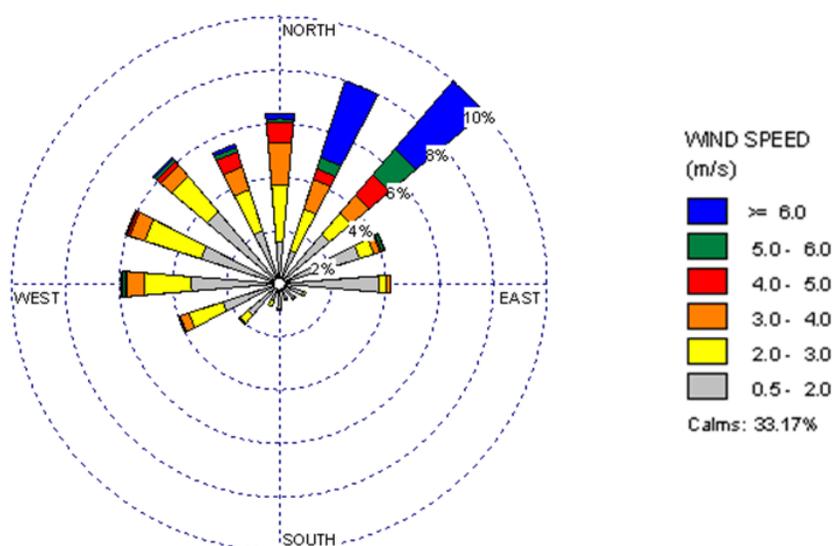


Figura IV.9: Rosa de los vientos para la madrugada (de 00:00 a 07:00 hrs.) en la estación Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

ii) Temperatura y velocidad del viento

La temperatura media anual registrada en las estaciones de monitoreo Temuco y Padre las Casas durante el año 2006 fue de 11,6 y 12 °C respectivamente, mientras que las velocidades del viento medias correspondieron a 1,7 y 2,8 m/s respectivamente. En la Figura IV.10 y Figura IV.11 se pueden observar los perfiles anuales de temperatura y velocidad del viento para Temuco y Padre las Casas respectivamente.

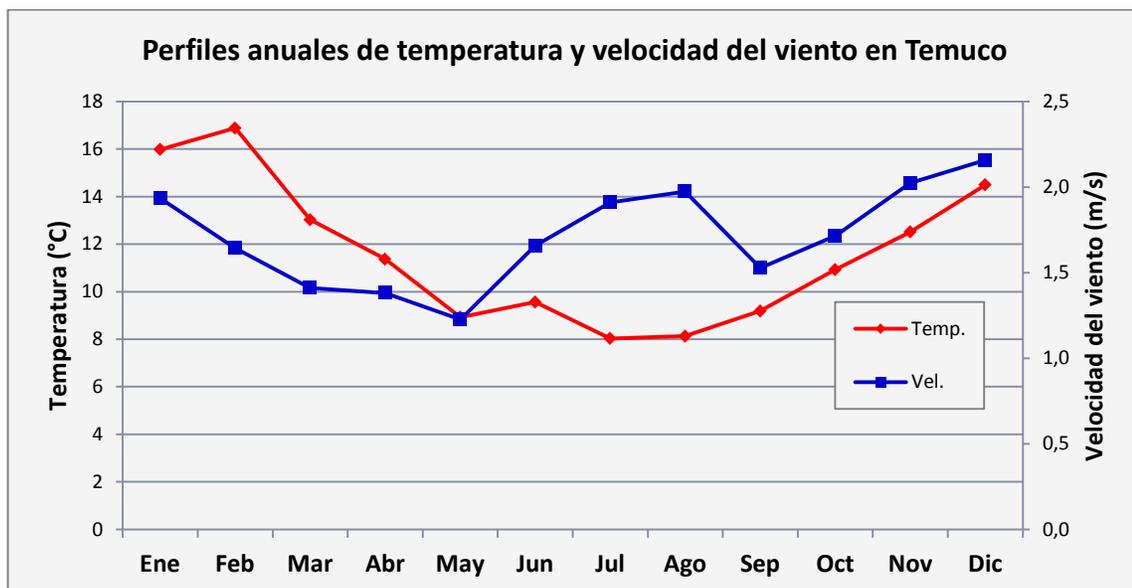


Figura IV.10: Perfiles anuales de temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s) en la estación de Temuco.
Fuente: elaboración propia.

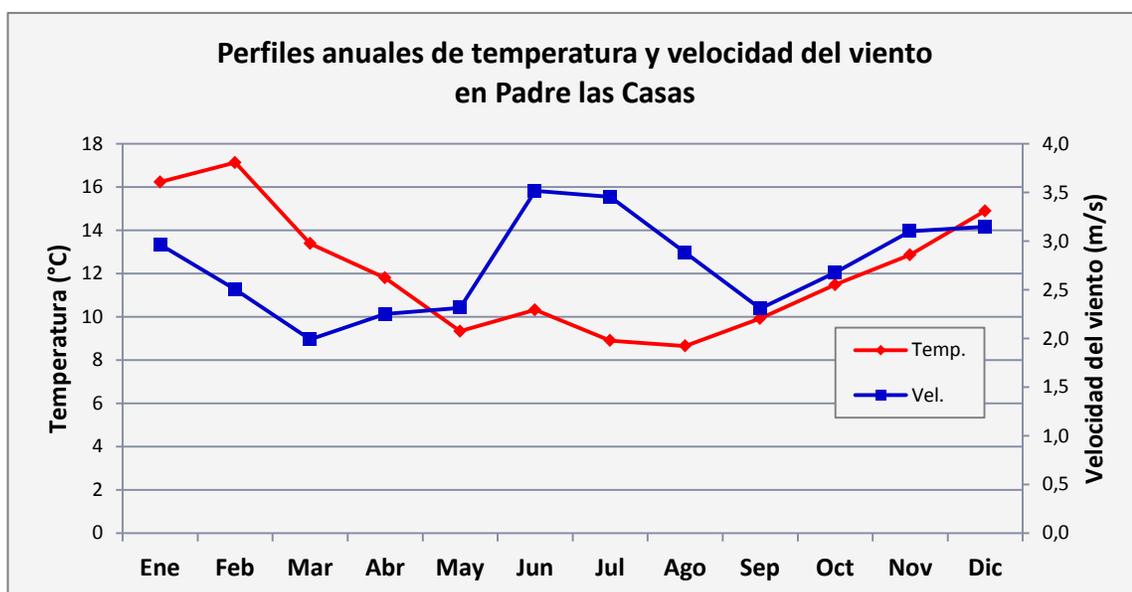


Figura IV.11: Perfiles anuales de temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s) en Padre las Casas.
Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que ambas estaciones registraron perfiles de temperatura similares, siendo las temperaturas en la estación de Temuco levemente inferiores a las registradas en la estación de Padre las Casas.

Los perfiles de velocidad del viento también presentan un comportamiento similar en ambas estaciones de monitoreo, mostrando ambas la existencia de máximos locales tanto en verano como en invierno y mínimos locales en otoño y primavera, sin embargo, las velocidades medias mensuales registradas son siempre mayores en Padre las Casas que en Temuco, lo que indica que existen mejores condiciones de ventilación en esta comuna.

iii) Humedad relativa

La humedad relativa media registrada en la estación de monitoreo de la comuna de Temuco fue algo mayor que la registrada en la estación de Padre las Casas, con un 77,9 y 73,3% respectivamente.

iv) Presión, radiación y precipitación

Sólo para la estación de monitoreo Temuco se registraron los valores de presión, radiación y precipitación, obteniéndose como valores medios anuales 1.004 mBar, 178 W/m^2 y 4,8 mm/día.

v) Altura y cobertura de nubes

Debido a la cercanía de ambas estaciones de monitoreo, se obtuvieron de la página web de la NASA antes mencionada, los mismos valores de altura y cobertura de nubes para ambas, siendo éstos en promedio 9.231 m y 1,4 tenths respectivamente.

4.1.2. Topografía

La información topográfica utilizada para cargar a CALPUFF fue obtenida de la página web de la *U.S. Geological Survey* (USGS)³, desde donde se descargó el archivo correspondiente a las alturas del terreno del dominio de simulación (S39W073.hgt). Dicho archivo correspondía a un paño de información que contenía las alturas del terreno en cada punto del dominio y que, una vez cargado en CALPUFF, mostraba las principales curvas de nivel del terreno, como se muestra en la Figura IV.12.

Las alturas del terreno en la ciudad de Temuco varían entre los 90 y los 130 msnm aproximadamente, ubicándose las estaciones de monitoreo de las comunas de Temuco y Padre las Casas a los 108 y 103 msnm respectivamente.

Ambas comunas se encuentran ubicadas en las terrazas fluviales formadas por el paso del río Cautín, que separa a ambas comunas, y encajonadas entre los cerros Ñielol por el Norte (340 msnm aproximadamente) y Conun Huenu por el Sureste (350 msnm aproximadamente), que destacan en la topografía del dominio de simulación y que explican cómo el flujo de masas de aire circula a través de la ciudad

³ U.S. Geological Survey (USGS). (2009). En *Index of /srtm/version2_1/SRTM3/South_America*. Recuperado el 26 de Abril de 2009, de http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/

predominantemente en la dirección Suroeste. El resto del dominio, en cambio, presenta alturas más bien parejas, variando éstas entre los 70 y 170 msnm.

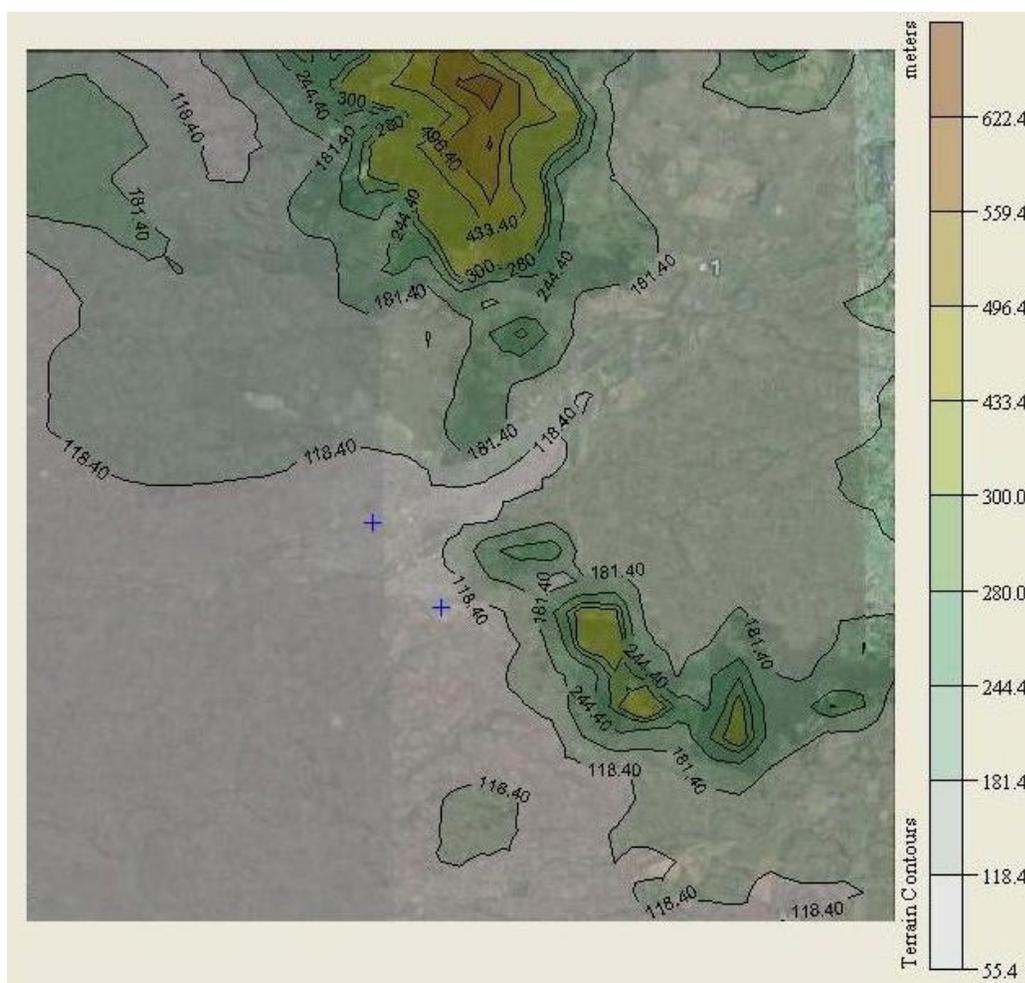


Figura IV.12: Visualización en CALPUFF del archivo de topografía del dominio de simulación.
Fuente: CALPUFF.

4.1.3. Usos de suelo

Para la definición de los tipos de usos de suelo presentes dentro del dominio de simulación, se utilizó como base un archivo en formato shapefile que contenía información de los usos de suelo de todo Chile y que se encontraba disponible en la página web del Sistema Nacional de Información Ambiental Territorial (SINIA)⁴.

El archivo de usos de suelo de Chile se utilizó dentro de CALPUFF, en la opción *Land use creator*, para crear una grilla con celdas de 1 km² que describieran el uso de suelos dentro del dominio. De esta forma, se obtuvieron los usos de suelo mostrados en la Figura IV.13 y cuya clasificación corresponde a:

- 10: Zona urbana.
- 20: Zona con cultivos de agricultura.
- 30: Zona con pastizales.
- 40: Zona con bosques variados.

⁴ Sistema Nacional de Información Ambiental Territorial (SINIA). (2009). En *SINIA TERRITORIAL*. Recuperado el 30 de Abril de 2009, de <http://territorial.sinia.cl/portal/descargas.php>

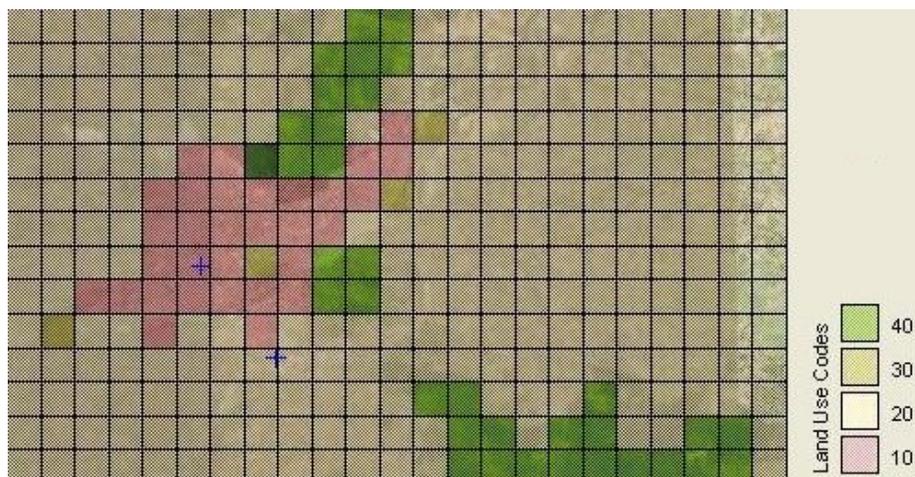


Figura IV.13: Grilla con los tipos de usos de suelos presentes dentro del dominio de simulación.
Fuente: CALPUFF.

4.1.4. Radiosondeo

La información de radiosondeo requerida por CALPUFF corresponde a datos de meteorología en altura para el lugar, es decir, a los perfiles, en función de la altura, de: presión; temperatura; humedad relativa; entre otros.

Para Chile existen sólo cuatro lugares donde se realizan radiosondeos: Antofagasta; Santo Domingo; Puerto Montt y Punta Arenas, disponibles en la página web de la Universidad de Wyoming⁵. Para la presente Tesis se utilizó la información correspondiente al radiosondeo de Puerto Montt debido a que correspondía a la localidad más cercana al dominio de simulación.

⁵ University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science. (2009). En *Sounding Map*. Recuperado el 4 de Mayo de 2009, de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

4.1.5. Emisiones

El inventario de emisiones de MP_{10} utilizado en el desarrollo de esta Tesis correspondió al del año 2005 de las comunas de Temuco y Padre las Casas, disgregado por tipo de fuente: fuentes puntuales; tipo grilla (o de área) y móviles, donde la información correspondiente a esta última se encontraba disponible en su equivalente de emisiones de fuentes de área.

La emisión total de MP_{10} ingresada para el dominio de simulación definido correspondió a 5.679 ton, donde el mayor aporte de emisiones fue realizado por las fuentes tipo grilla, como se observa en la Figura IV.14. Las emisiones totales se encontraban concentradas en los meses de otoño e invierno (de Marzo a Agosto), tal como se muestra en la Tabla IV.2, donde la estacionalidad se atribuye al mayor uso de leña en calefacción, ya que se asume que las fuentes móviles son más bien constantes todo el año. (Para más detalles ver Anexo A).

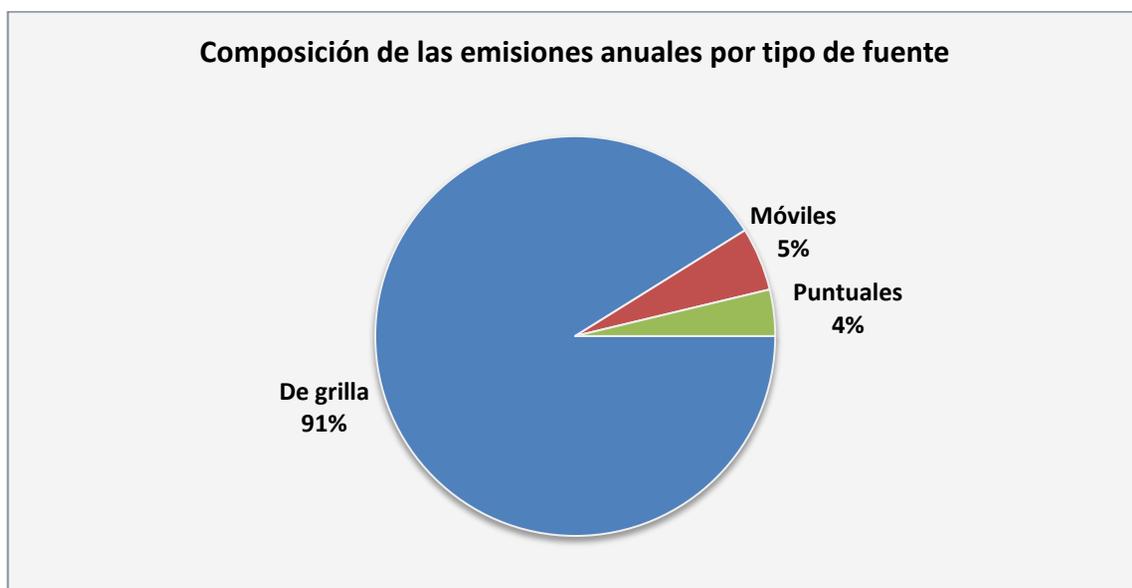


Figura IV.14: Participación por tipo de fuente en las emisiones totales del año 2005 del dominio de simulación.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.2: Emisiones de MP₁₀ estacionales de todas las fuentes (ton).

	Emisiones (ton)
Verano	1.027
Otoño	1.600
Invierno	1.818
Primavera	1.235
Total anual	5.679

Fuente: Elaboración propia.

a) Fuentes puntuales

El inventario de emisiones de las fuentes puntuales del dominio fue obtenido a partir de la base de datos de la CONAMA (2006) cargada en Airviro⁶, correspondiente al año 2005. Dicha base de datos contenía las 161 fuentes puntuales presentadas en la Figura IV.15 y contenía información correspondiente a: altura y diámetro interno de chimeneas; velocidad y temperatura de los gases emitidos; emisiones de MP₁₀; ubicación; y tipo de perfil de emisiones de la fuente.

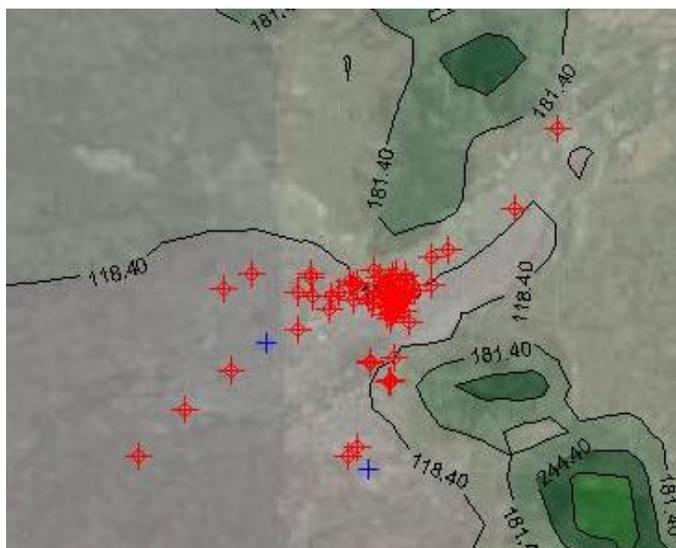


Figura IV.15: Ubicación de las fuentes puntuales dentro del dominio de simulación en CALPUFF.
Fuente: Elaboración propia.

⁶ Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). (2009). En *Airviro on the web*. Recuperado el 30 de Abril de 2009, de <http://sinca.conama.cl/iairviro>

Para las 161 fuentes existían sólo tres tipos de perfiles de emisiones: Constante, Caldera e Industria, donde las fuentes puntuales con perfil Constante o Industria, correspondían principalmente a industrias o empresas productoras, mientras que las con perfil Caldera correspondían principalmente a fuentes residenciales, como edificios. Se debe mencionar que los perfiles de emisiones se encuentran formados por los llamados factores de emisión, que ponderan el flujo medio anual de emisiones por un factor determinado, para obtener el flujo específico de emisiones que ocurre en una determinada unidad de tiempo.

El perfil Constante correspondía, como su nombre lo indica, a una emisión de MP_{10} constante durante todo el año, mientras que los otros perfiles presentaban diferentes factores de emisión horarios. El perfil Industria diario se mantenía sin cambios durante todos los días del año, mientras que el perfil Caldera mostraba una actividad permanente, aumentando su intensidad durante los meses de otoño e invierno. En la Figura IV.16 y Figura IV.17 se presentan los perfiles diarios para los perfiles de emisión Caldera e Industria respectivamente.

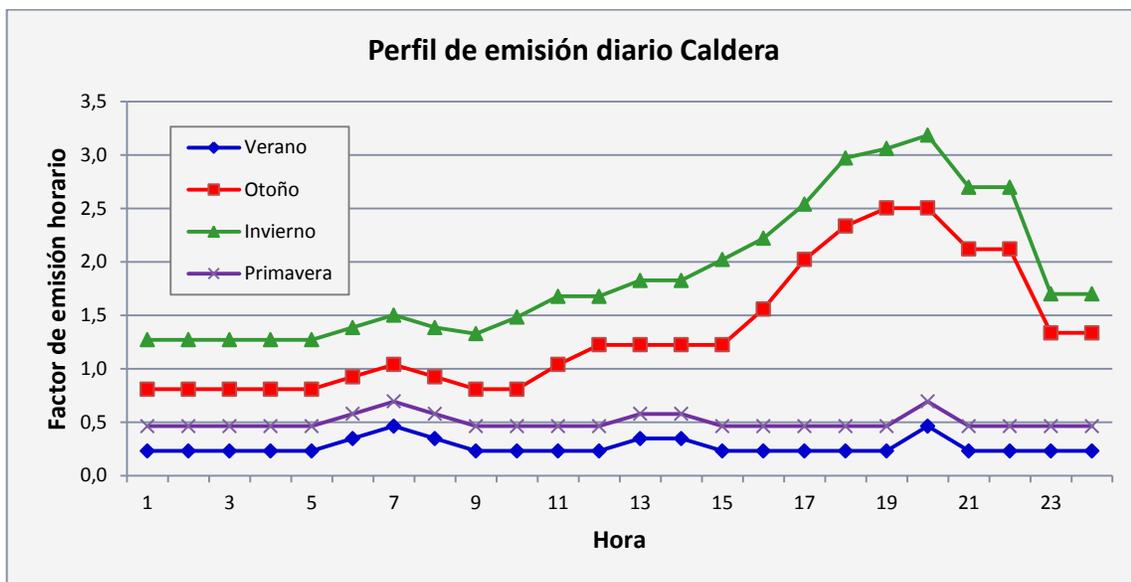


Figura IV.16: Perfil de emisión diario Caldera por estación, con factores de emisión horarios.
Fuente: Elaboración propia.

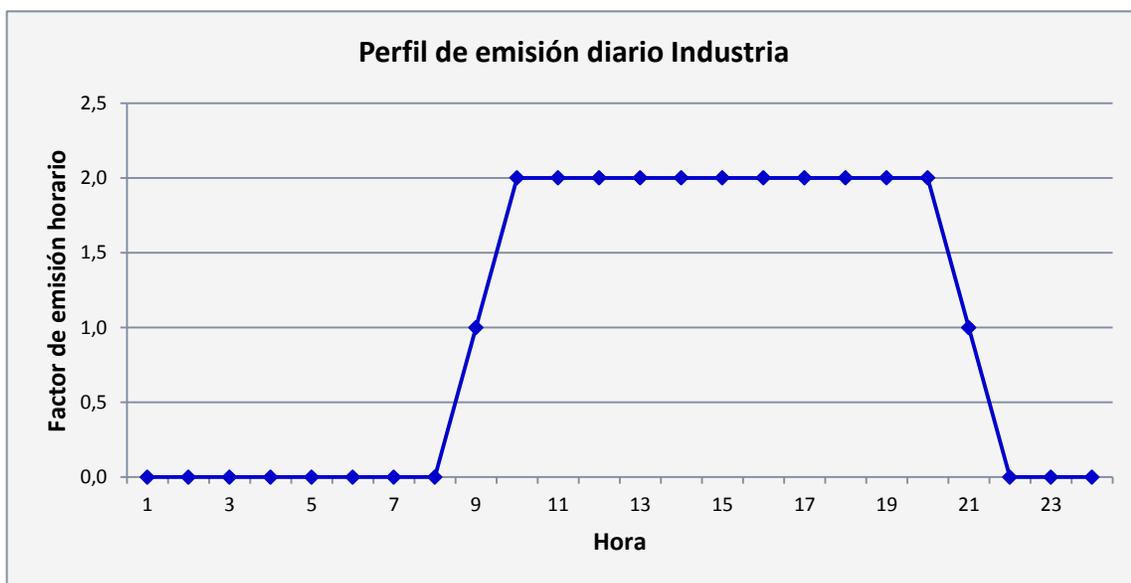


Figura IV.17: Perfil de emisión diario Industria, con factores de emisión horarios.
Fuente: Elaboración propia.

El aporte total de las fuentes puntuales correspondía a 221,1 ton/año, observándose mayores emisiones de MP₁₀ durante los meses de invierno, y un mayor aporte de emisiones por parte de las fuentes con emisión constante, el detalle de dichas emisiones puede observarse en la Tabla IV.3.

Tabla IV.3: Emisiones de MP₁₀ estacionales de las fuentes puntuales (ton).

Emisiones (ton)	Constante	Caldera	Industria	Total
Verano	37,0	0,0	9,3	46,4
Otoño	37,9	7,2	9,5	54,6
Invierno	37,9	22,8	9,5	70,2
Primavera	37,5	3,0	9,4	49,9
Total anual	150,2	33,0	37,8	221,1

Fuente: Elaboración propia.

b) Fuentes de área

La información correspondiente a las fuentes de área provenía de dos inventarios de emisiones para Temuco y Padre las Casas del año 2005: del inventario en forma de grilla de la base de datos de la CONAMA (2006), disponible en Airviro y previamente mencionada; y del inventario de emisiones de fuentes móviles de la base de datos de DICTUC S.A. (2009), generada con información facilitada por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA) y que se encontraba disponible en su equivalente en emisiones de fuentes de área.

El aporte de este tipo de fuentes representaba el 96% de la emisión total anual y su distribución estacional puede observarse en la Tabla IV.4.

Tabla IV.4: Emisiones de MP₁₀ estacionales de las fuentes de área (ton).

	Emisiones (ton)
Verano	981
Otoño	1.545
Invierno	1.748
Primavera	1.185
Total anual	5.458

Fuente: Elaboración propia

i) Fuentes móviles

El inventario de emisiones de fuentes móviles de DICTUC S.A. (2009) se encontraba disponible en su equivalente en fuentes de área. Esta base de datos contenía la información correspondiente a una grilla de 50 fuentes de área de 1 km² cada una, ubicadas exclusivamente dentro del territorio urbano del dominio y presentadas en la Figura IV.18.

Cada una de estas 50 fuentes de área poseía su propio perfil diario de emisiones horarias, idéntico para todos los días del año, siendo la emisión total anual de estas fuentes de 302,5 ton, correspondientes al 5,5% de las emisiones de fuentes de área.



Figura IV.18: Fuentes de área utilizadas en la simulación como correspondientes a las fuentes móviles.
Fuente: Elaboración propia.

ii) Fuentes tipo grilla

El inventario de emisiones en forma de fuentes de grilla de Airviro consideraba siete categorías de fuentes: Combustión Residencial de Leña (en adelante llamada Residencial); Calles; Quemadas; Incendios Forestales (en adelante Incendios); Combustión de Edificios (en adelante Edificios); Fuentes Fijas (en adelante Fijas); y Móviles Fuera de Ruta (en adelante Fuera).

El total de emisiones debido a la actividad de este tipo de fuentes consistía en 5.156 ton/año, representando así al 94,5% del total de emisiones de las fuentes de área y al 91% del total de las emisiones totales del dominio, donde la participación de cada categoría de estas fuentes en la emisión total de las fuentes tipo grilla se presenta en la Figura IV.19.

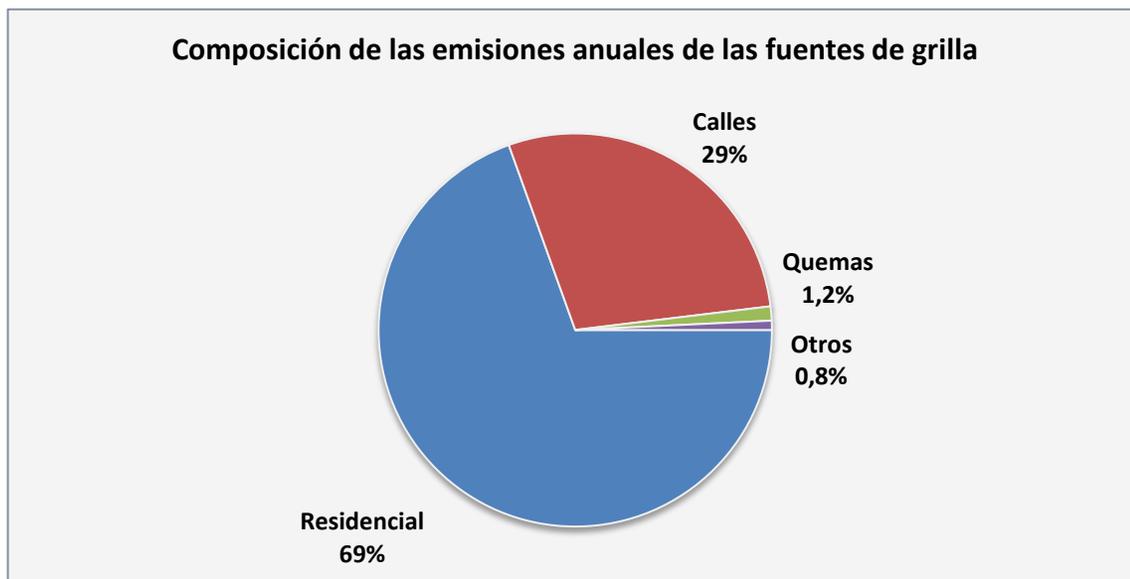


Figura IV.19: Participación de los diferentes tipos de fuentes en la emisión total de las fuentes tipo grilla.
Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las siete categorías de fuentes de grilla antes mencionadas, se obtuvo de Airviro la emisión proveniente de cinco polígonos en los que fue dividido el dominio, delimitados como se presenta en la Figura IV.20, obteniéndose así 35 fuentes de área. El polígono 1 corresponde a aproximadamente la mitad de la comuna de Temuco, y el 2 a la comuna de Padre las Casas junto a la mitad faltante de Temuco. La división de la zona urbana se realizó de forma que en los polígonos 1 y 2 quedaran ubicadas las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas respectivamente, además de separarlos mediante un transepto de Suroeste a Noreste (dirección de los vientos predominantes) para minimizar las influencias de las emisiones de un polígono en las concentraciones generadas en el otro, intentando minimizar interacciones. De esta forma se obtuvieron las toneladas anuales emitidas por cada polígono, para cada tipo de fuente, presentadas en la Tabla IV.5, y, en función del área de cada uno de ellos, se

calculó la emisión por área de cada uno, que fue ingresada posteriormente a CALPUFF y que se presenta en la Tabla IV.6.



Figura IV.20: Polígonos en los que fue dividido el dominio de simulación para organizar las emisiones de las fuentes tipo grilla de Airviro.

Fuente: *Google Earth*©.

Tabla IV.5: Toneladas anuales de MP₁₀ emitidas por tipo de fuente de grilla y por polígono (ton/año).

Emisión (ton/año)	Residencial	Calles	Quemas	Incendios	Edificios	Fijas	Fuera	Total
Polígono 1	2.149	57	2	1	1	0	0	2.210
Polígono 2	1.435	64	3	1	1	0	0	1.505
Polígono 3	0	792	33	7	7	1	2	842
Polígono 4	0	435	18	7	5	2	1	468
Polígono 5	0	124	4	2	0	1	0	131
Total	3.584	1.473	60	17	14	4	3	5.156

Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.6: Superficie y emisión por unidad de área de los polígonos en los que fue dividido el dominio para organizar las emisiones de las fuentes tipo grilla.

Polígono	Área (km²)	Emisión (ton/km²/año)
1	25,25	87,53
2	31,25	48,15
3	422,50	1,99
4	204,25	2,29
5	216,75	0,60

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla IV.5 se observa nuevamente que la mayor participación en las emisiones de las fuentes tipo grilla la tienen las fuentes residenciales, emisiones que principalmente provienen de los sistemas de calefacción a leña de los hogares.

Además de los datos de las emisiones de las fuentes tipo grilla ingresados a CALPUFF, se ingresó la información correspondiente a los perfiles de emisión de cada

tipo de fuente, diferentes para cada uno; la altura efectiva a la que se generaban dichas emisiones; y las coordenadas de cada uno de los vértices de los polígonos involucrados.

Los perfiles diarios de emisión, para cada estación del año, utilizados para las dos principales fuentes tipo grilla se presentan en la Figura IV.21 y Figura IV.22.

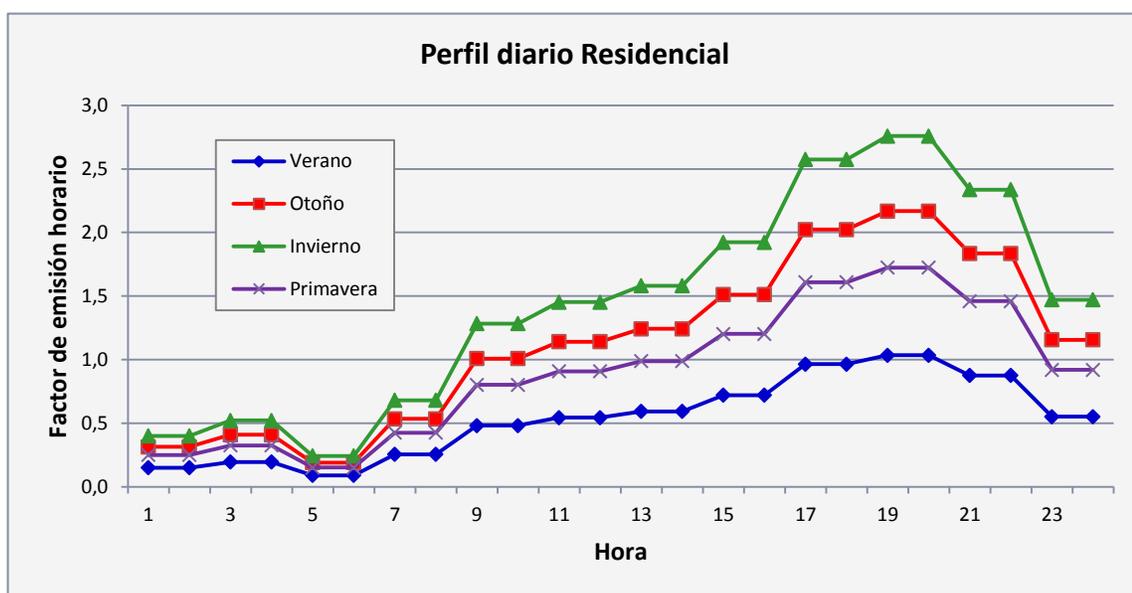


Figura IV.21: Perfil de emisiones diario Residencial por estación, con factores de emisión horarios.
Fuente: Elaboración propia.

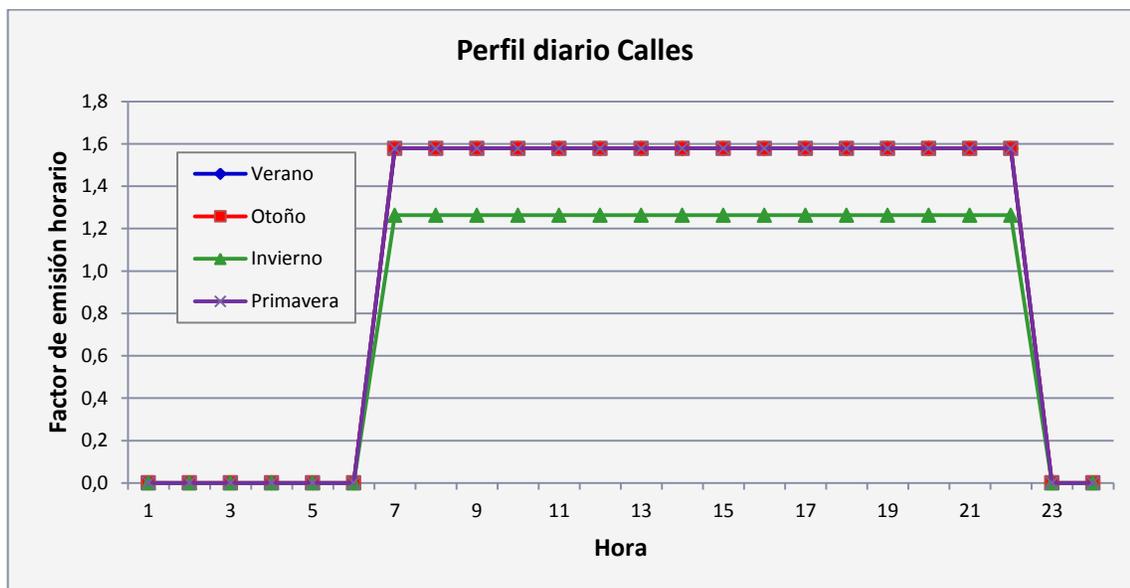


Figura IV.22: Perfil de emisiones diario Calles por estación, con factores de emisión horarios.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Receptores

Para la simulación en CALPUFF se definieron dos receptores de emisiones puntuales, localizados en los lugares correspondientes a las estaciones de monitoreo de ambas comunas, de manera de, al término de la simulación, obtener las concentraciones de MP_{10} en dichos puntos producidas por las emisiones de la simulación y poder compararlas con las recopiladas por medio del monitoreo ambiental en dichas estaciones.

4.2. Modelación inversa, mediante filtro de Kalman

Como se mencionó anteriormente, para alcanzar el objetivo de esta Tesis primero se debe corregir el inventario de emisiones de MP_{10} de las comunas de Temuco

y Padre las Casas, estimando su incertidumbre, a partir de los inventarios existentes para los diferentes tipos de fuentes existentes en dichas comunas. Para esto se utilizó la metodología de modelación inversa, específicamente del filtro de Kalman, cuya aplicación específica se explica en detalle a continuación.

4.2.1. Pasos previos

i) Redistribución del dominio de simulación:

Previo a la realización de la modelación inversa, se procedió a agrupar las fuentes según su ubicación, para obtener de esta forma tres nuevos polígonos conformados de la siguiente manera: las fuentes de área de los polígonos 1 y 4 anteriormente definidos, se agruparon para conformar las fuentes correspondientes a la comuna de Temuco; las fuentes de área del polígono 2 original se le asignaron a la comuna de Padre las Casas; mientras que las fuentes de área ubicadas en los polígonos 3 y 5 junto con todas las fuentes puntuales, debido a su bajo aporte a las emisiones totales, se agruparon como fuentes de fondo, en adelante *background*. Cada uno de estos nuevos polígonos será en adelante llamado polígono de Temuco, Padre las Casas y *background* respectivamente.

ii) Estimación del *background* regional:

Los resultados de la simulación en CALPUFF consideraban las concentraciones generadas en los receptores por emisiones ocurridas exclusivamente dentro del dominio de simulación definido en la Figura IV.20. Sin embargo, se sabe que el MP_{10} posee aportes de carácter regional, por la presencia de fuentes externas al

dominio modelado. Por esto, se debió hacer una estimación de la concentración de *background* regional, es decir, de la concentración generada en ambos receptores producto de emisiones ocurridas fuera del dominio y que estarían siendo trasladadas hasta éstos por el viento. Específicamente, esta relación se encuentra definida por la Ecuación $Y_t = Y_{reg}^{back} + Y_{sim}$, donde Y_t corresponde al vector de concentraciones observadas en los receptores, Y_{reg}^{back} al de las concentraciones de *background* regional e Y_{sim} al de las concentraciones obtenidas al simular la dispersión de todas las emisiones en el dominio de simulación.

Dado lo anterior, se puede calcular una regresión entre las concentraciones observadas y simuladas, estimándose $y_t = a \cdot y_{sim} + b$, donde $b = y_{reg}^{back}$ correspondería a un estimador del valor del *background* regional, ya que éste es independiente de los valores simulados, siendo parte de las observaciones.

Los valores diarios del *background* regional utilizados fueron calculados utilizando dos estimaciones para cada comuna; una para la época cálida (primavera y verano) y otra para la época fría (otoño e invierno). Dichas estimaciones se obtuvieron por medio de una regresión robusta de mínimos cuadrados, específicamente la llamada *Least trimmed squares robust regression* en el programa de análisis de datos S-PLUS[®], ingresando las concentraciones de MP₁₀ simuladas por CALPUFF (valores x de la serie) y las concentraciones observadas en el monitoreo (valores y de la serie), donde, como se mencionó anteriormente, el intercepto con el eje y de la regresión correspondía al *background* regional que se deseaba estimar. Las ecuaciones de las regresiones encontradas para cada comuna se presentan en la Tabla IV.7 y en la Figura IV.23 y Figura IV.24 se presentan las relaciones obtenidas para cada comuna y época.

Tabla IV.7: Regresiones robustas encontradas para ambas comunas, para las dos épocas del año ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Época	Temuco	Padre las Casas
Cálida	$y = 0,25x + 14,65$	$y = 0,76x + 15,50$
Fría	$y = 0,55x + 14,65$	$y = 1,14x + 10,50$

Fuente: Elaboración propia.

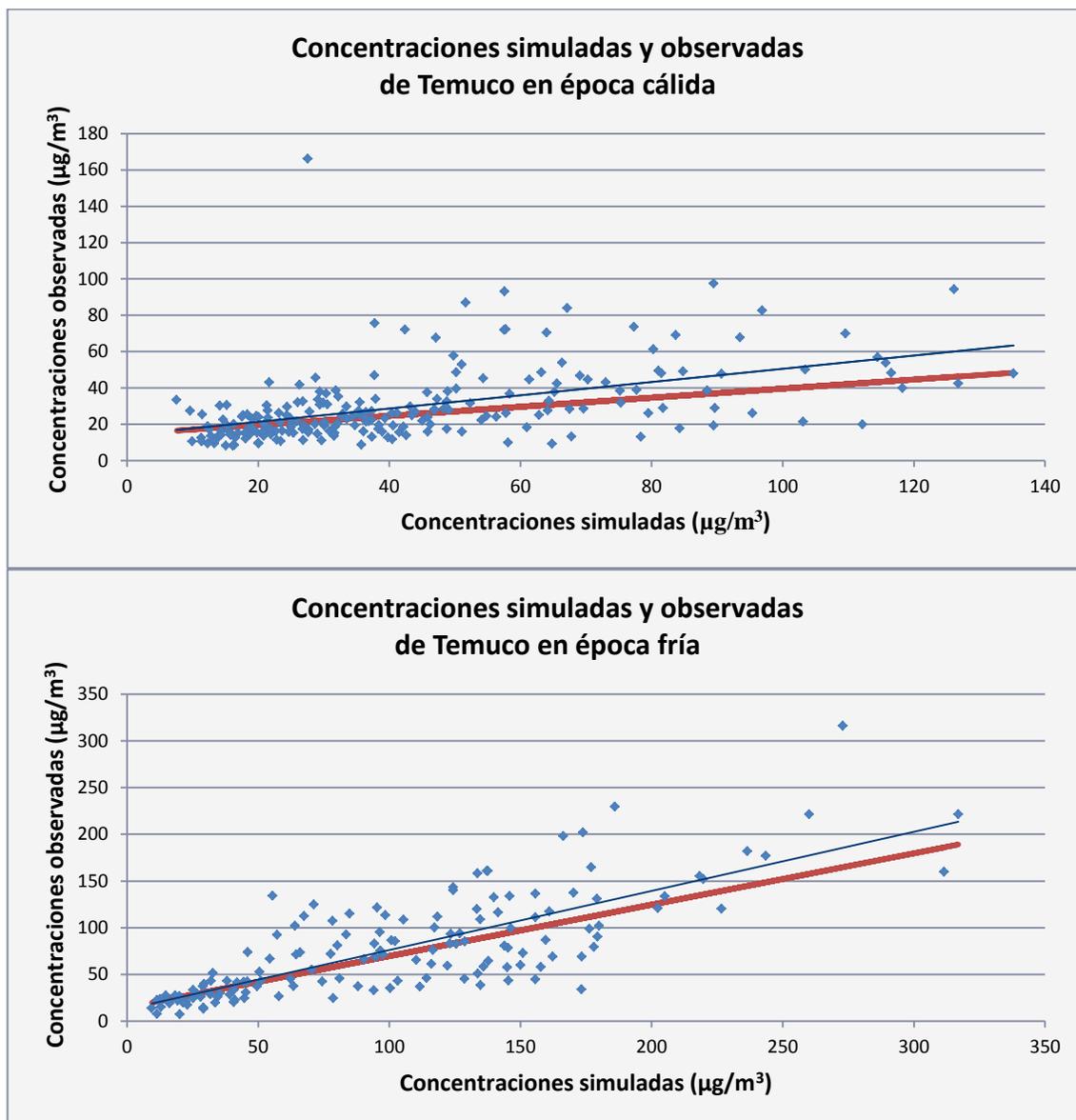


Figura IV.23: Relación entre las concentraciones simuladas en CALPUFF y las observadas en el monitoreo ambiental, para el receptor de la comuna de Temuco para la época cálida y fría. En negro: regresión lineal de mínimos cuadrados a modo de referencia, y en rojo: regresión lineal de mínimos cuadrados robusta utilizada para la estimación del *background* regional.

Fuente: Elaboración propia.

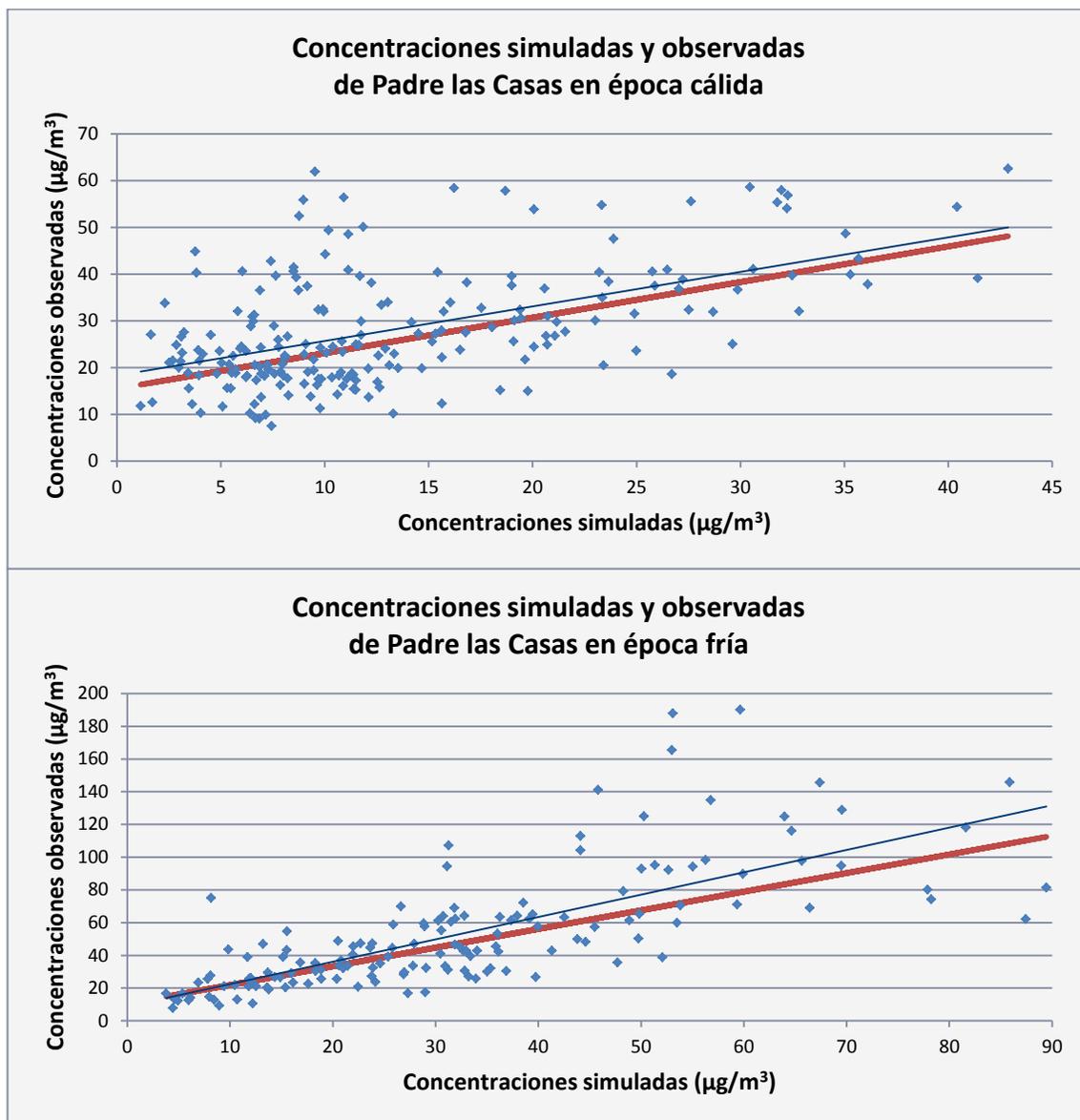


Figura IV.24: Relación entre las concentraciones simuladas en CALPUFF y las observadas en el monitoreo ambiental, para el receptor de la comuna de Padre las Casas para la época cálida y fría. En negro: regresión lineal de mínimos cuadrados a modo de referencia, y en rojo: regresión lineal de mínimos cuadrados robusta utilizada para la estimación del *background* regional.

Fuente: Elaboración propia.

Las estimaciones del *background* de esta forma obtenidas fueron divididas por el promedio de concentraciones observadas de la época del año respectiva para usar

así el porcentaje de las concentraciones observadas correspondiente al *background* regional, y no una estimación fija de éste que pudiera generar concentraciones corregidas negativas. Los porcentajes de *background* calculados se presentan en la Tabla IV.8. Los mayores valores de *background* encontrados en la época cálida se explican por vientos más intensos y bajas humedades relativas, lo que favorece el levantamiento de polvo superficial por acción eólica, mientras que en invierno ello no ocurre.

Tabla IV.8: Porcentaje de las concentraciones observadas correspondiente a *background* regional para ambas comunas, para las dos épocas del año (%).

<i>Background</i> regional (%)	Temuco	Padre las Casas
Época cálida	46,5	55,4
Época fría	22,2	21,4

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se ponderaron las concentraciones de MP_{10} observadas en ambas comunas por el correspondiente porcentaje estimado de *background* regional, obteniéndose así las estimaciones diarias del *background* regional para ambas comunas, para las dos épocas del año diferenciadas.

iii) División del inventario de emisiones:

El inventario de emisiones totales se dividió en tres inventarios parciales que agrupaban las emisiones de todas las fuentes pertenecientes a cada uno de los tres polígonos en los que se dividió el dominio.

iv) Corridas en CALPUFF:

Se corrió el modelo CALPUFF tres veces; una para cada uno de los inventarios parciales generados.

v) Resultados previos:

De las simulaciones en CALPUFF se obtuvieron las concentraciones de MP_{10} , producidas por cada uno de los inventarios de emisiones parciales, en ambos receptores definidos para la simulación.

4.2.2. Implementación del filtro de Kalman

La implementación del filtro de Kalman para realizar la corrección del inventario de emisiones, se realizó con un código programado por el profesor Héctor Jorquera en el programa computacional MATLAB[®] (Ver Anexo B), que realizaba las etapas descritas a continuación:

a) Ingreso de datos

Inicialmente el código requería cargar la siguiente información de entrada:

- Emisiones diarias de cada comuna: Ingresadas en ton/día.

- Valor de σ_R (error relativo del modelo con respecto a las observaciones): Calculado en base al desempeño medio del modelo para ambas comunas en conjunto, es decir, comparando la media anual simulada con la observada, obteniéndose un error relativo del 40%

- Valor de σ_0 (error en las concentraciones observadas debido a la resolución de los instrumentos de medición): Correspondiente a $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambas comunas.

- Concentraciones diarias observadas en cada comuna: Ingresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ver Anexo C).

- Concentraciones diarias de *background* suburbano simuladas en ambos receptores: Ingresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, corresponden a las concentraciones obtenidas en los receptores producto de emisiones ocurridas dentro del dominio de simulación, pero fuera de los polígonos de Temuco y Padre las Casas, es decir, corresponden a las concentraciones obtenidas de la corrida realizada en CALPUFF con sólo las emisiones de las fuentes del polígono de *background* activadas.

- Indicadores numéricos para identificar a qué día de la semana corresponde cada día del año: Tomaban valores del 1 al 7; 1 para Lunes, 2 para Martes, etc.

- Coeficientes de las emisiones diarias para cada comuna: Correspondían al valor por el que se debía ponderar una emisión corregida diaria para obtener la emisión a priori del día siguiente, en función del día de la semana en el que ésta ocurría. Estos coeficientes fueron estimados a partir de la relación entre las concentraciones observadas medias para cada día de la semana, obteniéndose de esta forma siete coeficientes para cada comuna. Estos coeficientes posteriormente se usaban para conformar la matriz de evolución de \mathbf{x}_t , \mathbf{M}_t , de la primera Ecuación de (3.17).

- Concentraciones diarias simuladas con las emisiones de Temuco en ambos receptores: Ingresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, corresponden a las concentraciones obtenidas en

ambos receptores de la corrida en CALPUFF realizada con las emisiones de las fuentes ubicadas exclusivamente en el polígono de la comuna de Temuco.

- Concentraciones diarias simuladas con las emisiones de Padre las Casas en ambos receptores: Análogo al anterior, pero proveniente de la corrida realizada con las emisiones de las fuentes ubicadas en el polígono de la comuna de Padre las Casas.

b) Aplicación del filtro de Kalman

Utilizando la información cargada, se realiza la modelación inversa según lo presentado en el marco teórico, considerando los siguientes aspectos específicos de la aplicación del filtro al caso desarrollado en la presente Tesis:

- Para iniciar el proceso de modelación inversa, se utilizó como estimación a priori del estado X_{a1} la información contenida en el inventario de emisiones original, correspondiente al primer día de simulación. De esta forma, X_{a1} corresponde a un vector columna de dos elementos con las emisiones ocurridas en el primer día de simulación en las comunas de Temuco y Padre las Casas respectivamente, como se muestra en la Ecuación (4.1).

$$X_{a1} = \begin{bmatrix} \text{Emisión}_{\text{TCO}}^1 \\ \text{Emisión}_{\text{PLC}}^1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Donde Emisión_j^i corresponde a la emisión, en ton/día, ocurrida el día i , en la comuna j , donde, en adelante, $j=1$ representa a la comuna de Temuco y $j=2$ representa a la de Padre las Casas.

- La matriz \mathbf{M}_t se construyó asumiendo que los componentes de \mathbf{x}_t no estaban correlacionados entre sí y que, por lo tanto, \mathbf{M}_t correspondía a una matriz diagonal con los valores de los cocientes de las emisiones diarias de ambas comunas en su diagonal.

- Se consideró (en forma conservadora) al error ξ_t de la primera Ecuación de (3.15) como el 50% de la magnitud de las emisiones y que no había correlación entre los componentes de \mathbf{X}_{at} , por lo que la matriz \mathbf{S}_{ξ_1} quedó definida por la matriz diagonal mostrada en la Ecuación (4.2).

$$\mathbf{S}_{\xi_1} = 0,25 \cdot \text{diag}(\mathbf{x}\mathbf{x}^T) \quad (4.2)$$

Donde $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{a1}$ (la validez de esta suposición será posteriormente probada realizando un análisis de sensibilidad por medio de una simulación de Monte Carlo).

- Debido a que la modelación inversa se aplicaría exclusivamente sobre las emisiones de Temuco y Padre las Casas, se debió modificar la segunda Ecuación de (3.15) para que las concentraciones observadas ingresadas a la modelación inversa fueran producto de exclusivamente las emisiones de dichos polígonos. Específicamente se corrigieron las concentraciones observadas originales eliminando la componente de la concentración correspondiente a emisiones ocurridas fuera de las comunas de Temuco y Padre las Casas (ver Sección 4.2.1), por lo que la Ecuación de (3.15) se expresó como la Ecuación (4.3).

$$y_t = y_t^{\text{obs}} - y_{\text{reg}}^{\text{back}} - y_{\text{suburb}}^{\text{back}} \quad (4.3)$$

Donde y_t corresponde a las concentraciones observadas que finalmente se utilizaron en la modelación inversa; y_t^{obs} corresponde a las concentraciones observadas originales, registradas en ambas estaciones de monitoreo y cargadas previamente a MATLAB[®]; $y_{\text{reg}}^{\text{back}}$ corresponde a la concentración de *background* regional previamente estimada; e $y_{\text{suburb}}^{\text{back}}$ corresponde a la concentración de *background* suburbano obtenida previamente de la simulación correspondiente realizada en CALPUFF y cargada previamente a MATLAB[®].

Luego, para el día t , se utilizaron las concentraciones diarias corregidas correspondientes a ese día para generar el vector de observaciones y_t , de la forma como se muestra en la Ecuación (4.4).

$$y_t = \begin{bmatrix} \text{Conc.corr}_{\text{TCO}}^t \\ \text{Conc.corr}_{\text{PLC}}^t \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Donde Conc.corr_j^t corresponde a la concentración observada corregida, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obtenida el día t , en la comuna j .

c) Obtención de resultados

A medida que el código realiza las iteraciones del filtro de Kalman para todos los días del año simulado, guarda tanto las emisiones diarias óptimas \hat{x}_t como las

concentraciones que éstas generarían en los receptores, en matrices de 365 filas y dos columnas, correspondientes a las comunas de Temuco y Padre las Casas respectivamente, donde se da término a las iteraciones del filtro al completar con datos ambas matrices.

4.2.3. Reducción de emisiones para el cumplimiento de la normativa ambiental del MP_{10}

Además del análisis de los resultados obtenidos de la metodología anteriormente descrita, se realizó, como análisis adicional para alcanzar el objetivo de la presente Tesis, el cálculo de la reducción de emisiones necesaria para que en Temuco se cumpliera con las normas que actualmente regulan el MP_{10} en la atmósfera en Chile.

El Plan de Descontaminación Atmosférica de Temuco y Padre las Casas que recientemente entró en vigencia, establece como objetivo el lograr una reducción de las concentraciones de MP_{10} en la zona actualmente saturada, de forma que éstas cumplan con la norma primaria de calidad ambiental que regula este contaminante, dentro de un plazo de diez años. Sin embargo, este enunciado sólo considera de manera implícita la relación existente entre emisiones y concentraciones, donde una reducción de las concentraciones ambientales sólo es posible por medio de una disminución de las emisiones que las generan. De esta forma, si el objetivo final corresponde a la reducción en las concentraciones, se debe cuantificar las medidas a realizar para lograrlo, es decir, resulta necesario cuantificar la reducción de emisiones que generaría dicha disminución deseada en las concentraciones.

En la presente Tesis se hace una estimación cuantitativa de dichas metas de reducción de emisiones, utilizando los resultados obtenidos de la modelación inversa para calcular la reducción de las emisiones de Temuco y Padre las Casas necesaria para obtener concentraciones que cumplan con la normativa ambiental.

Dichos cálculos se realizaron utilizando las emisiones diarias corregidas de ambos polígonos, las matrices diarias fuente-receptor \mathbf{K}_t calculadas con la modelación inversa y los valores diarios de *background* total estimados para ambos receptores, calculando, para cada día, la Ecuación (4.5).

$$\begin{bmatrix} y_{\text{TCO}} \\ y_{\text{PLC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{\text{TCO}}^{\text{back}} \\ y_{\text{PLC}}^{\text{back}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-r_1)\hat{x}_{\text{TCO}} \\ (1-r_2)\hat{x}_{\text{PLC}} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Donde y_i corresponde a las concentraciones que se observarán en ambos receptores al realizar las disminuciones porcentuales r_1 y r_2 sobre las emisiones corregidas \hat{x}_{TCO} y \hat{x}_{PLC} de Temuco y Padre las Casas respectivamente, $y_{\text{TCO}}^{\text{back}}$ e $y_{\text{PLC}}^{\text{back}}$ corresponden al *background* total estimado en cada receptor, es decir, a la suma de los *backgrounds* regional y suburbano, y las componentes \mathbf{K}_{ij} de la matriz fuente-receptor representan el impacto de las emisiones de la región j en las concentraciones de MP_{10} registrados en la región i . Este concepto de matriz fuente-receptor ha sido empleado extensivamente en países desarrollados para evaluar diversos instrumentos de mejoramiento de la calidad del aire (Mendelsohn y Müller, 2006; Levy, 2009), empleado el mismo modelo CALPUFF que se ha usado en esta Tesis.

En concreto, se calcularon los porcentajes de reducción de emisiones para dos escenarios:

- i) Reducción de exclusivamente las emisiones corregidas del polígono correspondiente a Temuco, es decir, $r_2=0$.
- ii) Reducción de las emisiones corregidas totales, correspondientes a los polígonos de Temuco y Padre las Casas, es decir, $r_1=r_2$.

Donde el primer escenario se basa en el supuesto que las emisiones corregidas obtenidas para el polígono de Padre las Casas no pueden ser reducidas debido a que dicha zona es habitada principalmente por población de bajos ingresos y, por ende, posee hábitos de quema de leña difíciles de cambiar, mientras que el segundo supone un porcentaje de reducción idéntico para ambas comunas, contribuyendo de igual medida al cumplimiento de la norma diaria en la zona.

Además, para ambos escenarios, se calcularon los porcentajes de reducción de emisiones necesarios para alcanzar los niveles de saturación y de latencia para las normas anual y diaria, cuyos criterios de evaluación se resumen en la Tabla IV.9.

Tabla IV.9: Criterios para determinar si las normas diaria y anual de MP_{10} se encuentran superadas en sus niveles de saturación o latencia.

Superación de la norma	Saturación	Latencia
Norma diaria	Percentil 98 > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Percentil 98 > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Norma anual	Media anual > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual > 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Simulación de Monte Carlo

Para determinar la sensibilidad de los resultados obtenidos en la modelación inversa y probar empíricamente la robustez del modelo, se realizó una simulación de Monte Carlo.

4.3.1. Implementación

La implementación de la simulación de Monte Carlo, realizada para revisar los resultados obtenidos de la modelación inversa, fue efectuada con el mismo código de MATLAB[®] utilizado para la modelación inversa, luego de realizarle ciertas modificaciones para que realizara 5.000 modelaciones inversas utilizando diferentes valores de ciertos parámetros de error y guardara los resultados obtenidos para su posterior análisis (Ver Anexo D).

Se debe mencionar que se decidió utilizar los resultados de 5.000 iteraciones debido a que correspondía a un número suficientemente grande como para encontrar resultados estables, sin alargar demasiado los tiempos de procesamiento del programa. Esto se comprobó realizando una simulación con 10.000 iteraciones, cuyos resultados variaron menos del 3,5% con respecto a los obtenidos con las 5.000 iteraciones, por lo que un número mayor de éstas no influía significativamente en los resultados.

Para cada una de las modelaciones inversas realizadas dentro de la simulación de Monte Carlo se asignaron valores aleatorios dentro de cierto rango a tres parámetros involucrados: al error relativo del modelo con respecto a las observaciones para ambas comunas, σ_R ; al error relativo en la estimación de las emisiones para el primer día, ξ_1 ; y al error relativo en la actualización de las emisiones posteriores al primer día usando la matriz M_t , ξ_t . Los rangos en los que se variaron los valores de dichos parámetros se especifican en la Tabla IV.10, siendo los valores superiores bastante conservadores.

Tabla IV.10: Valores entre los que se variaron aleatoriamente los parámetros σ_R , ξ_1 y ξ_t en la simulación de Monte Carlo (%).

Parámetros (%)	Desde	Hasta
σ_R	20	60
ξ_1	20	40
ξ_t	10	40

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del código de la simulación de Monte Carlo se realizaban 5.000 modelaciones inversas, por lo que, al comienzo de cada una de ellas, a los parámetros se les asignaba aleatoriamente un valor que no cambiaba hasta la siguiente modelación y que se guardaba como registro posterior.

En cada una de las modelaciones los cálculos realizados eran básicamente los mismos que los detallados en la sección anterior, exceptuando las ecuaciones correspondientes a los cálculos de: la matriz de covarianza del error de las observaciones S_{et} ; la matriz de covarianza del error en la estimación a priori de la emisión del primer día S_{al} ; y la matriz de covarianza del error en la estimación a priori de las emisiones del resto de los días S_{at} (segunda Ecuación de (3.17)), que, debido a los cambios en los valores de estos tres parámetros, debían ser reemplazadas por las Ecuaciones (4.6) respectivamente.

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_{et} &= \left(\text{diag} \left(\sigma_R y_t + \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \sigma_0 \end{bmatrix} \right) \right)^2, \quad t = 1..365 \\
\mathbf{S}_{a1} &= \mathbf{S}_{\xi_1} = \xi_1 \text{diag}(\mathbf{x}_{a1} \mathbf{x}_{a1}^T) \\
\mathbf{S}_{at} &= \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{S}}_{t-1} \mathbf{M}_t^T + \xi_t \text{diag}(\mathbf{x}_{at} \mathbf{x}_{at}^T), \quad t = 2..365
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Una vez realizadas las 5.000 modelaciones dentro de la simulación de Monte Carlo, para cada una de las comunas, se obtuvieron las emisiones diarias corregidas que fueron almacenadas en matrices a procesar posteriormente. De dichas matrices se obtuvo la media y desviación estándar de las emisiones diarias corregidas de cada comuna, además de las concentraciones diarias que dichas emisiones generarían en cada comuna.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF

En total en CALPUFF se realizaron cuatro simulaciones, una para cada uno de los tres polígonos en los que se dividió el dominio (los polígonos de Temuco y Padre las Casas, que contenían exclusivamente fuentes de área, y el polígono *background*, que contenía tanto fuentes de área como puntuales), con el fin de obtener resultados parciales que se usarían posteriormente en la modelación inversa; y una para todas las fuentes del dominio en conjunto. En esta sección se presentan sólo los resultados obtenidos en la última mencionada, ya que ella considera todas las fuentes de emisión.

Una vez ingresados los datos necesarios para la simulación en CALPUFF y corrido el modelo con las emisiones de todas las fuentes ubicadas dentro del dominio, se obtuvieron las concentraciones horarias de MP_{10} , para todo el año simulado, en ambos receptores puntuales ya definidos. La Figura V.1 muestra el mapa de concentraciones obtenido de la simulación en CALPUFF con las concentraciones promedio anuales obtenidas para todo el dominio de simulación definido, mientras que la Figura V.2 muestra la evolución anual de las concentraciones diarias de MP_{10} obtenidas de la simulación completa en ambos receptores (Ver Anexo E).

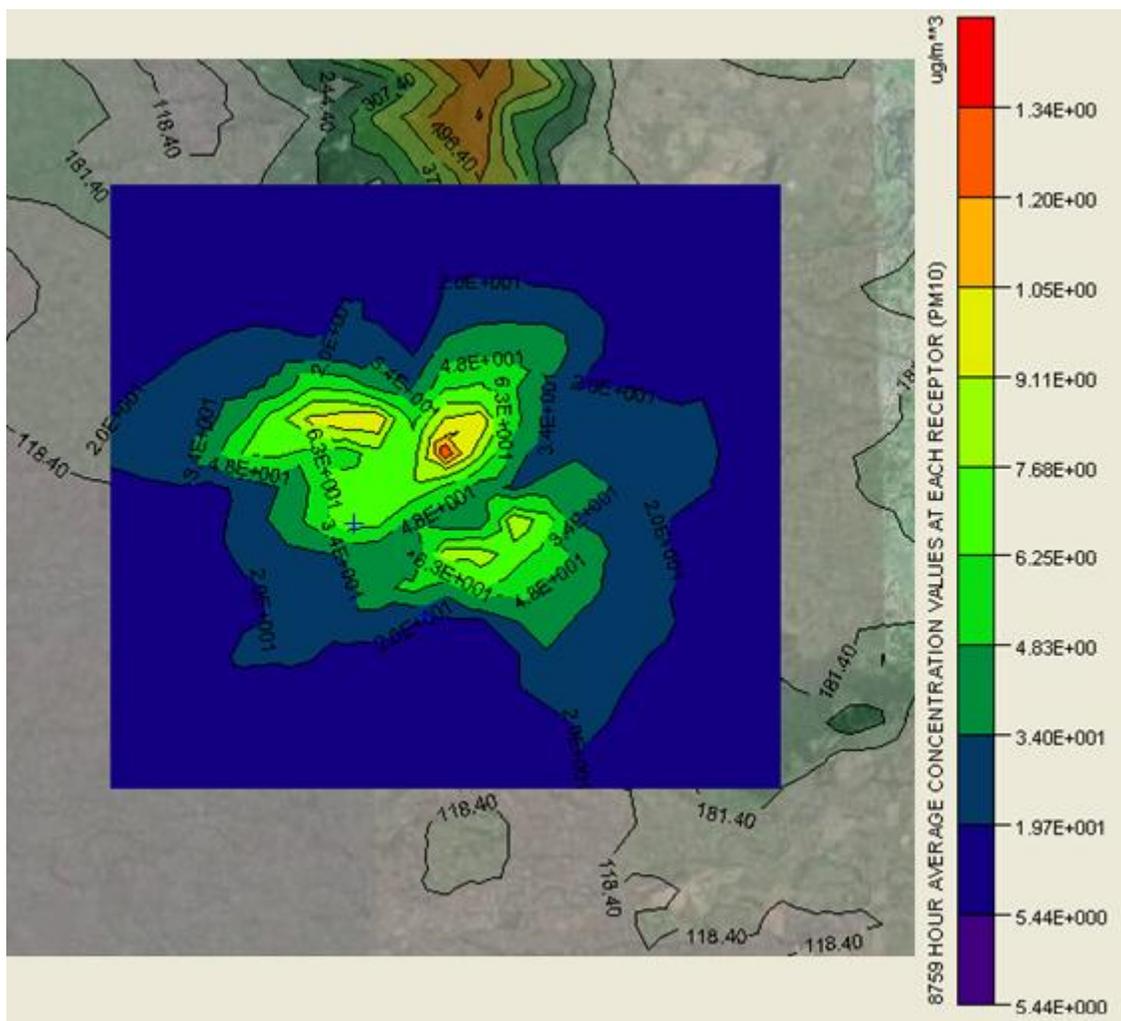


Figura V.1: Mapa de concentraciones promedio anuales sobre el dominio de simulación, obtenido de la simulación realizada en CALPUFF para el año 2006.
Fuente: Elaboración propia.

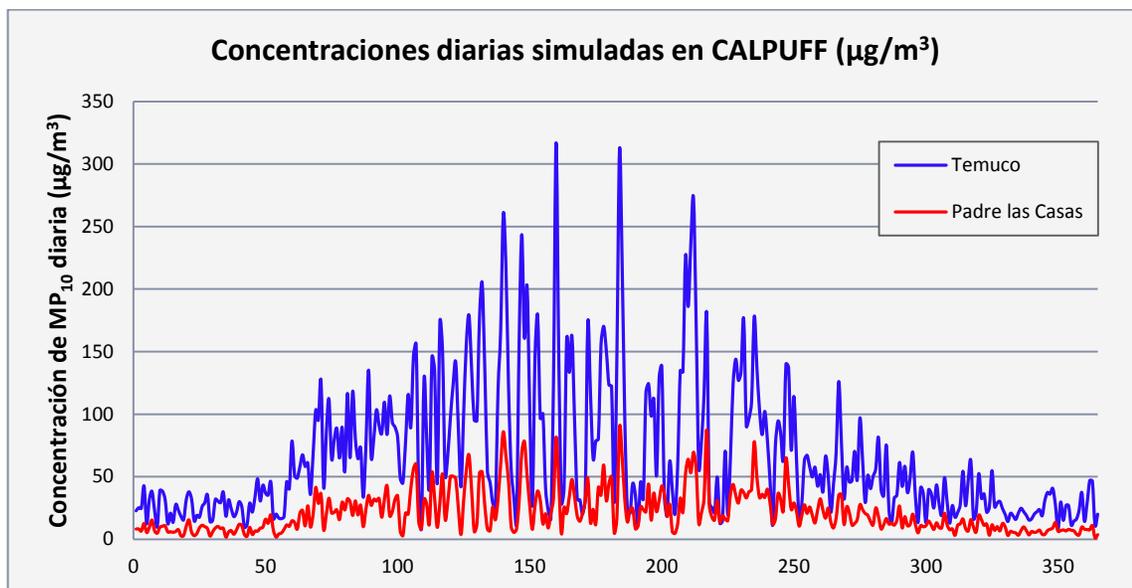


Figura V.2: Concentraciones diarias de MP_{10} simuladas en CALPUFF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los receptores de Temuco y Padre las Casas con todas las fuentes del dominio activas.

Fuente: Elaboración propia.

La estadística de las concentraciones diarias obtenidas de la simulación se presenta en la Tabla V.1. Específicamente se presenta la concentración media anual, la desviación estándar, la cantidad de días en los que se observaron concentraciones superiores a los 120 y $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el percentil 98 de los valores diarios. En rojo se presentan los valores que exceden la normativa vigente y en naranja los que excederían la normativa que podría regir a partir del año 2012. Luego, la simulación captura las diferencias observadas entre ambas comunas.

Tabla V.1: Estadística de las concentraciones diarias simuladas para ambos receptores.

	Temuco	Padre las Casas
Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	67,0	21,1
Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	55,0	17,0
Núm. días [C] > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	63	0
Núm. días [C] > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	32	0
Percentil 98 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	219,4	68,9

Fuente: Elaboración propia.

Se observa de esta forma que con las concentraciones simuladas para la comuna de Temuco se sobrepasan tanto la norma diaria como la anual. En cambio, para las concentraciones simuladas para la comuna de Padre las Casas no se sobrepasa ninguna de las normas primarias actuales ni la que podría entrar en vigencia el año 2012.

Las distribuciones mensuales de las concentraciones diarias simuladas en ambos receptores se pueden apreciar en los *box plots*⁷ de la Figura V.3 y Figura V.4.

⁷ Los gráficos de *box plot* resumen, para cada variable categórica, la distribución de una variable mediante una 'caja' que está acotada por los percentiles 25 y 75 de los datos, con una línea que indica la posición de la mediana. A continuación se añaden barras verticales que definen el intervalo de valores que toma la variable. Finalmente, los valores extremos u *outliers* se indican con símbolos \times .

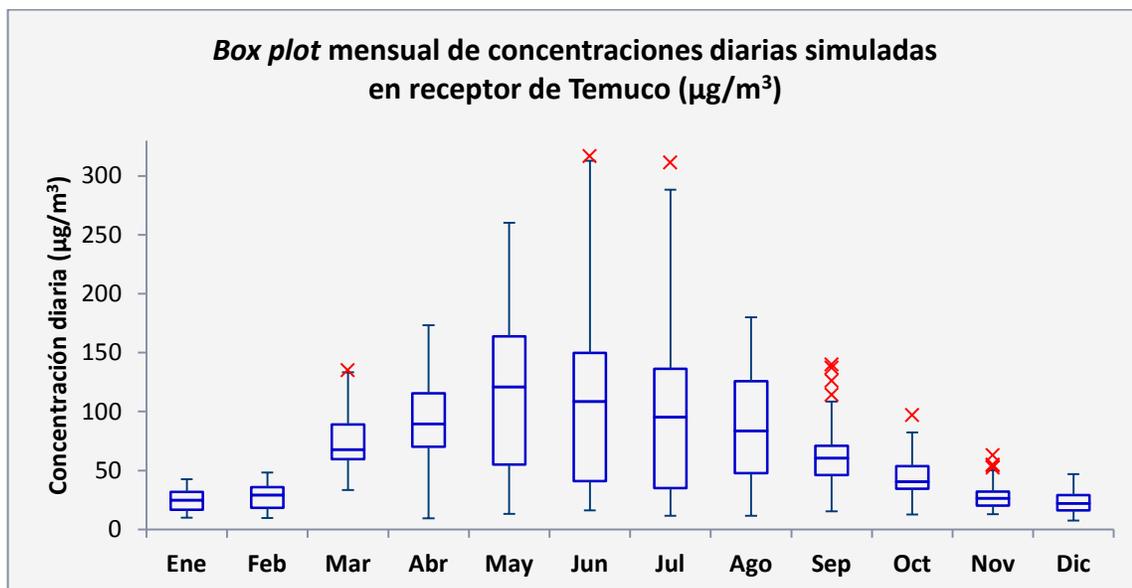


Figura V.3: *Box plot* mensual de las concentraciones diarias simuladas para el receptor de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

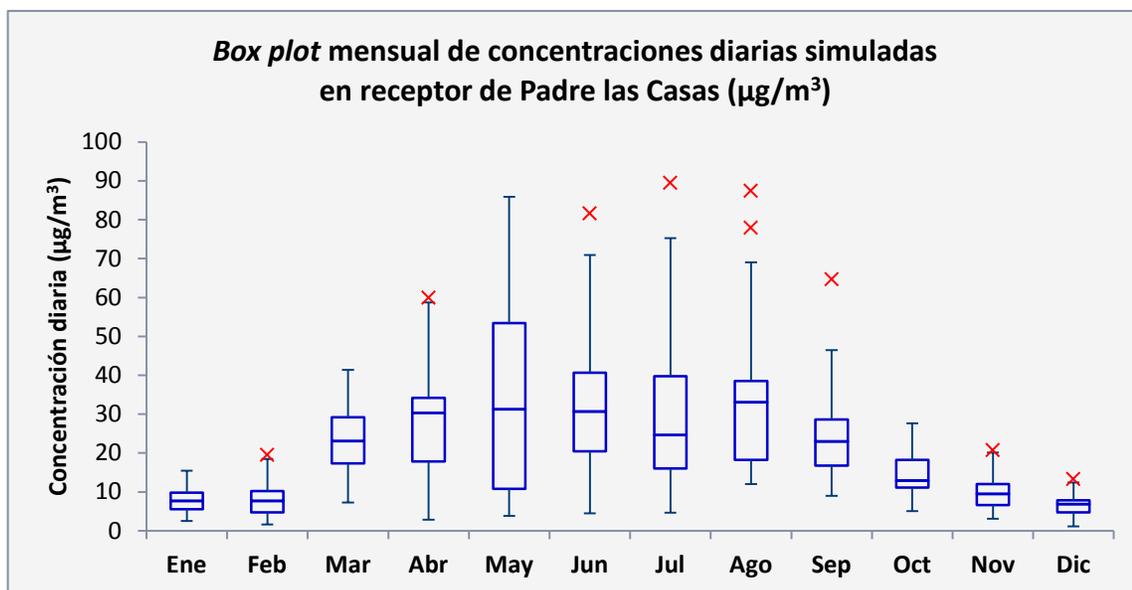


Figura V.4: *Box plot* mensual de las concentraciones diarias simuladas para el receptor de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

En ambos receptores se observa la tendencia de las concentraciones simuladas de aumentar durante los meses de invierno, debido al aumento del consumo de leña para calefacción residencial causado por las menores temperaturas, ya manifestado en el inventario de emisiones, y a la mayor estabilidad atmosférica presente en dicha estación del año. La máxima media mensual de concentraciones simuladas en los receptores se obtuvo para ambos en el mes de Mayo, correspondiendo este valor a $119,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el receptor de la comuna de Temuco, y a $35,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el de Padre las Casas. Por otra parte, la mínima media mensual de concentraciones simuladas se obtuvo para ambos receptores en el mes de Diciembre, donde se obtuvieron medias de $24,3$ y $6,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Temuco y Padre las Casas respectivamente.

La desviación estándar mensual también aumenta durante los meses de invierno, alcanzando un valor máximo de $82,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de Julio en la comuna de Temuco y de $24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de Mayo en Padre las Casas; esto debido que en ese período del año se alternan episodios de acumulación, con días con lluvia con bajas concentraciones de MP_{10} .

La Figura V.5 y Figura V.6 muestran la relación existente entre las concentraciones observadas y las simuladas para cada día del año en las comunas de Temuco y Padre las Casas respectivamente, las líneas de tendencia de dichas relaciones y sus respectivas ecuaciones lineales representativas.

La pendiente de la ecuación menor a la unidad para Temuco sugiere que las emisiones originalmente ingresadas a CALPUFF se encuentran en promedio sobrestimadas, de forma que, para que los resultados entregados por CALPUFF se asemejen más a las observaciones registradas, en general habría que reducir las emisiones diarias. Por el contrario, para la comuna de Padre las Casas, la pendiente es mayor a la unidad, lo que sugiere que las emisiones originalmente ingresadas a CALPUFF se encuentran en promedio subestimadas.

Por otro lado, el intercepto de la línea de tendencia con el eje y representa la componente de la concentración debida a emisiones que ocurren fuera del dominio de

simulación, es decir, al *background* regional, correspondiendo éste a $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Temuco y a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Padre las Casas. Estos valores, sin embargo, representan un factor de corrección global que no permite mejorar significativamente la correlación entre ambas variables, como lo haría un factor estacional, y, además, incluyen los valores no representativos de las series (*outliers*) que distorsionan su valor. Por esto último es que dichos valores no fueron utilizados como estimaciones directas del *background* regional de cada comuna, si no que estimados con una regresión robusta como ya se explicó en la metodología.

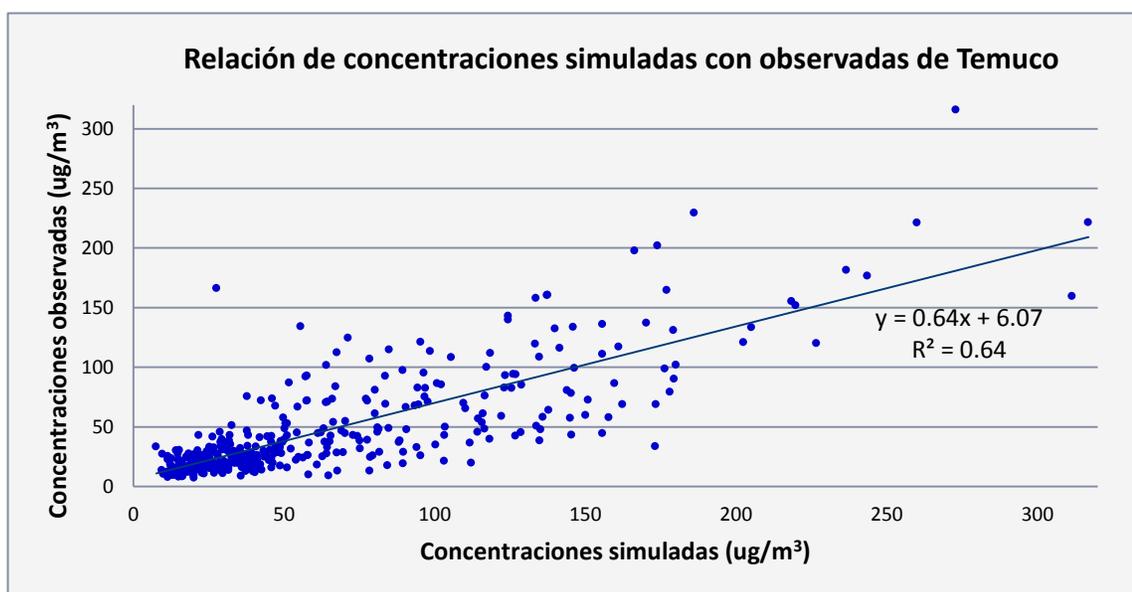


Figura V.5: Relación entre las concentraciones simuladas y observadas para la comuna de Temuco y su respectiva línea de tendencia y ecuación lineal representativa.

Fuente: Elaboración propia.

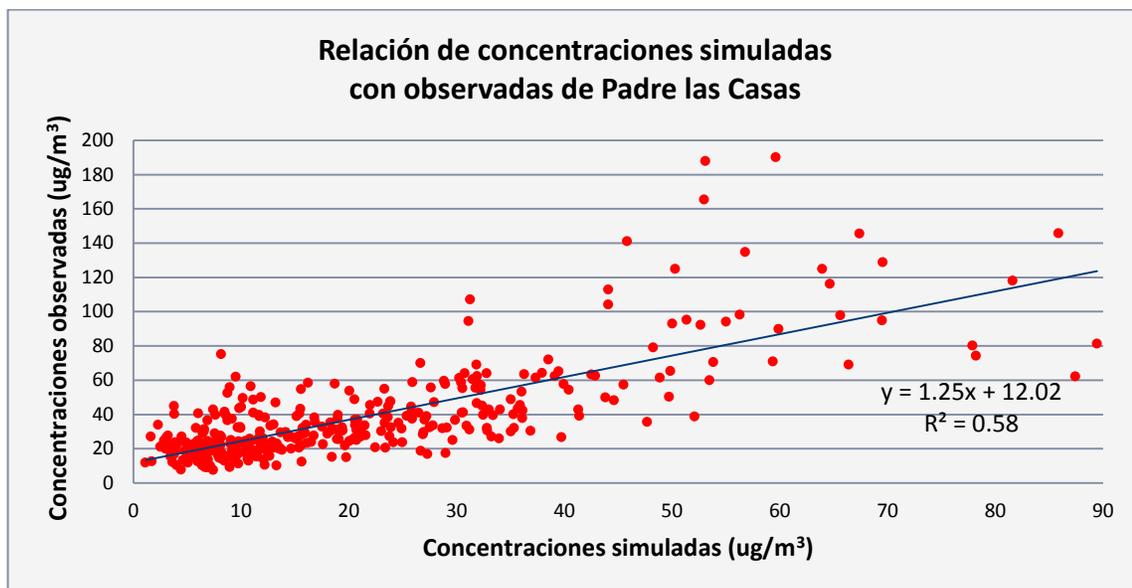


Figura V.6: Relación entre las concentraciones simuladas y observadas para la comuna de Padre las Casas y su respectiva línea de tendencia y ecuación lineal representativa.

Fuente: Elaboración propia.

Para los días en los que se contaba con concentraciones diarias observadas de MP_{10} , se compararon las observaciones con los valores obtenidos de la simulación, pero corregidos sumándoles el *background* regional. La Figura V.7 y Figura V.8 muestran los resultados obtenidos para las comunas de Temuco y Padre las Casas respectivamente.

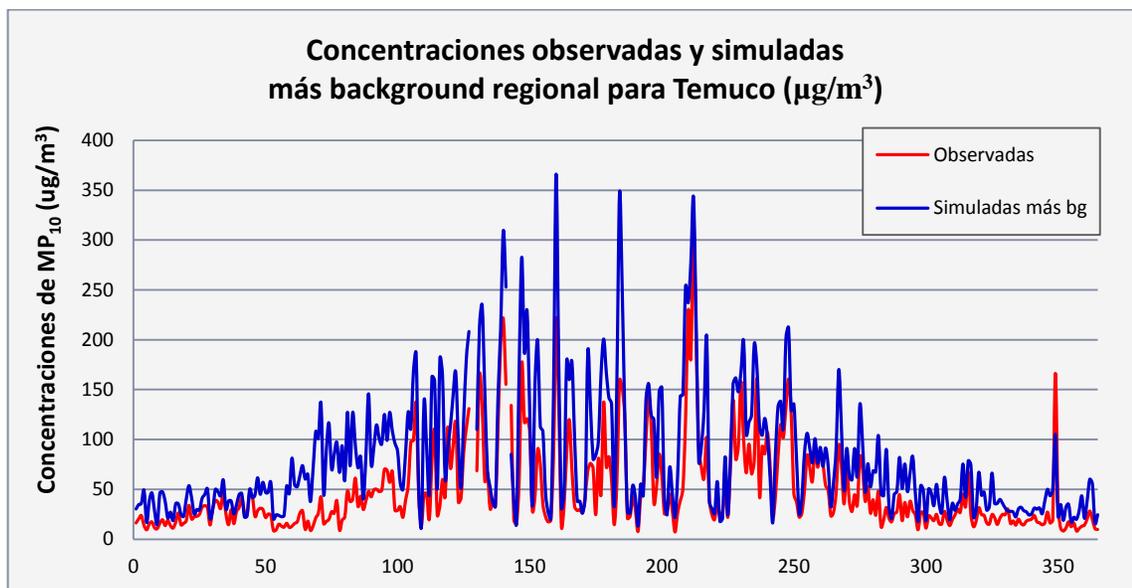


Figura V.7: Concentraciones diarias de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el receptor de Temuco. En rojo: concentraciones observadas y en azul: concentraciones simuladas más el *background* regional.

Fuente: Elaboración propia.

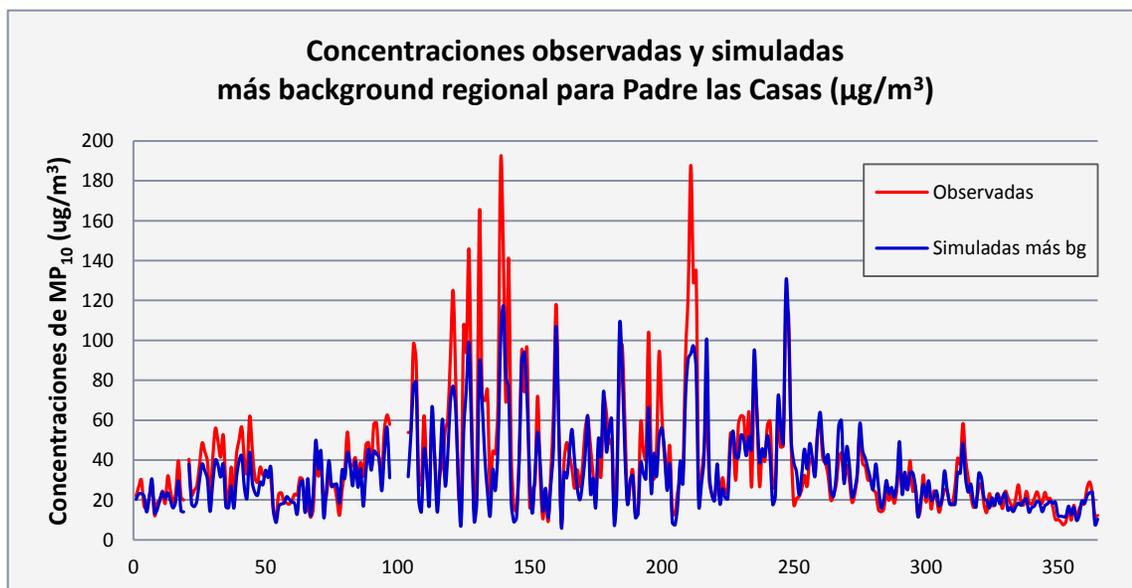


Figura V.8: Concentraciones diarias de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el receptor de Padre las Casas. En rojo: concentraciones observadas y en azul: concentraciones simuladas más el *background* regional.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla V.2 y Tabla V.3 se presentan las estadísticas de los resultados obtenidos para la comuna de Temuco, presentándose en la tercera columna los porcentajes en los que los resultados obtenidos de la simulación más el *background* regional son mayores que las observaciones.

Tabla V.2: Comparación entre las concentraciones observadas y las obtenidas de la simulación más la estimación del *background* regional para la comuna de Temuco.

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observadas	Simuladas + <i>background</i> regional	<u>(Simuladas - Observadas)</u> Observadas
Media anual	48,8	81,3	66,7%
Mínimo	7,2	12,5	72,6%
Máximo	316,2	366,1	15,8%
Percentil 98	174,5	253,3	45,1%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla V.3: Comparación de la cantidad de días con concentraciones superiores a 120 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de las observaciones y de las concentraciones obtenidas de la simulación más el *background* regional para la comuna de Temuco.

Número de días	Observadas	Simuladas + <i>background</i> regional	<u>(Simuladas - Observadas)</u> Observadas
[C] > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	29	81	179,3%
[C] > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	16	49	206,3%

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura V.7 y de las dos Tablas anteriores, se aprecia que las concentraciones obtenidas de la simulación, sobrestiman a las observadas de la estación de monitoreo de Temuco, siendo la media de las concentraciones simuladas 67% más

alta que la media de las concentraciones observadas. Además, se observa una mayor variabilidad en los valores simulados más el *background* regional, especialmente debido a la notable sobrestimación de las situaciones con altas concentraciones, como las presentadas en la Tabla V.3. Dada esta relación, se concluye que las emisiones de dicha comuna se encuentran sobrestimadas en el inventario base.

Por su parte, para la comuna de Padre las Casas, se presentan las estadísticas de los resultados obtenidos en la Tabla V.4, presentándose en la tercera columna los porcentajes en los que los resultados obtenidos de la simulación son, en este caso, menores que las observaciones.

Tabla V.4: Comparación entre las concentraciones observadas y las obtenidas de la simulación más la estimación del *background* regional para la comuna de Padre las Casas.

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observadas	Simuladas + <i>background</i> regional	<u>(Simuladas - Observadas)</u> Observadas
Media anual	38,5	34,2	-11,0%
Mínimo	7,5	6,1	-18,7%
Máximo	190,1	129,0	-32,2%
Percentil 98	128,2	98,4	-22,3%

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la cantidad de días con concentraciones superiores a 120 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sólo se obtuvo un valor superior a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Padre las Casas, correspondiente a una disminución del 90% de lo obtenido de las observaciones.

De la Figura V.8 y de la Tabla anterior se aprecia que las concentraciones simuladas considerando el *background* regional subestiman a las observadas en la estación de monitoreo de Padre las Casas, siendo la media de las concentraciones simuladas un 11% menor a la media de las concentraciones observadas, por lo que se

concluye que las emisiones de dicha comuna se encuentran subestimadas en el inventario base.

Los resultados del análisis estadístico realizado para ambas comunas, en base a lo descrito en el marco teórico, se presentan en la Tabla V.5.

Tabla V.5: Resultados del análisis estadístico de las concentraciones observadas y las simuladas en CALPUFF, considerando el *background* regional, para ambas comunas.

	Temuco	Padre las Casas
Desviación estándar de lo observado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44,1	27,9
Desviación estándar de lo modelado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	62,3	21,2
Concentración media del residual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-32,5	4,2
Diferencia media normalizada (%)	-66,7	11,0
n° de datos	362	358
Error cuadrático medio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	46,0	14,6
Error cuadrático medio sistemático ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34,0	10,3
Error cuadrático medio no sistemático ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	31,0	10,3
Coefficiente de correlación	0,86	0,87
Índice de evaluación	0,82	0,91
Pendiente b	1,23	0,66
Intercepto a ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	21,53	8,72

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia media normalizada, junto con las tres clases de errores cuadráticos medios, indican que los resultados de la simulación para Padre las Casas presentan un mejor desempeño que los obtenidos para Temuco, debido a que éstos subestiman las observaciones en un 11% de su valor registrado, mientras que los

obtenidos para Temuco las sobrestiman en un 67%, además de presentar menores valores de los errores cuadráticos medios. Sin embargo, para ambas comunas se obtuvieron índices de evaluación bastante cercanos a la unidad, tomando un valor levemente superior el correspondiente a Padre las Casas, lo que indica que hay bastante similitud entre las concentraciones observadas y las simuladas para ambas comunas. Esto implica que el modelo no presenta sesgos meteorológicos y, por lo tanto, puede ser utilizado para la corrección del inventario de emisiones.

5.2. Modelación inversa, mediante filtro de Kalman

Habiendo realizado la modelación inversa, se obtuvieron tanto las emisiones diarias corregidas para los polígonos de ambas comunas, como las concentraciones que dichas emisiones generarían en ambos receptores, para los días en los que se contaba con observaciones de MP_{10} , resultados presentados a continuación. Adicionalmente se presenta el análisis realizado con los resultados de la modelación inversa para estimar la reducción de emisiones necesaria para dar cumplimiento a las normas que regulan el MP_{10} en Chile actualmente.

5.2.1. Emisiones

La modelación inversa entregó las emisiones diarias corregidas mostradas en la Figura V.9 para ambas comunas (Ver Anexo F), correspondiendo éstas a 1.125 ton/año para Temuco y a 3.409 ton/año para Padre las Casas, obteniéndose así un total de emisiones de 4.534 ton/año para toda la zona urbana. Dichos valores de emisiones anuales significan una disminución del inventario original de Temuco, correspondiente a 2.822 ton/año, en un 60% y un aumento del inventario original de Padre las Casas, correspondiente a 1.663 ton/año, en un 105%, por lo que de manera global hay un

aumento de las emisiones totales en 49 ton/año, apenas un 1%. Es decir, la emisión total de la zona urbana prácticamente no ha cambiado después de la corrección, pero la distribución espacial sí ha cambiado drásticamente.

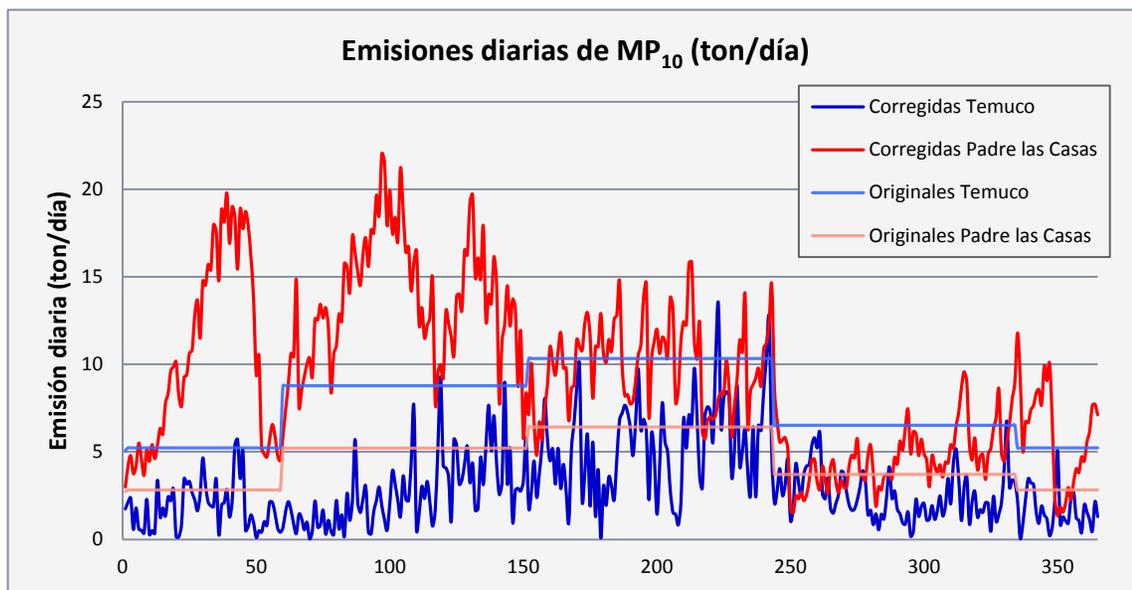


Figura V.9: Emisiones diarias de MP_{10} originales y corregidas con la modelación inversa para Temuco y Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla V.6 se presentan las estadísticas de las emisiones diarias originales y de las corregidas por la modelación inversa para ambas comunas.

Tabla V.6: Resumen con los valores representativos de las emisiones diarias originales ingresadas a la modelación inversa y las corregidas para ambas comunas.

Emisiones (ton/día)	Temuco		Padre las Casas	
	Originales	Corregidas	Originales	Corregidas
Media anual	7,7	3,1	4,6	9,3
Desviación estándar	2,0	2,3	1,4	4,7
Mínimo	5,1	0,03	2,7	1,4
Máximo	10,3	13,5	6,4	22,0

Fuente: Elaboración propia.

Además, para apreciar la distribución mensual de las emisiones corregidas para cada comuna, en la Figura V.10 y Figura V.11 se presentan los respectivos *box plots* mensuales de los datos obtenidos. De las Figuras se observa que para Temuco existe una estacionalidad consistente con lo esperado; los meses con menores temperaturas presentan mayores emisiones que los más cálidos.

Para el caso de Padre las Casas se da una situación similar, excepto que en los meses de Enero y Febrero se estiman emisiones mucho mayores que las estimadas para Temuco en esos mismos meses. Esto solamente se puede explicar por la presencia de fuentes locales tales como quemas agrícolas, es decir, un patrón de actividad distinto a lo que ocurre en Temuco en dichos meses.

Pese a las diferencias observadas, en ambas zonas se aprecia una drástica caída en las emisiones estimadas a partir del mes de Septiembre, siendo las emisiones aproximadamente constantes entre Septiembre y Diciembre, pero siempre manteniéndose un mayor nivel de emisiones en Padre las Casas que en Temuco.

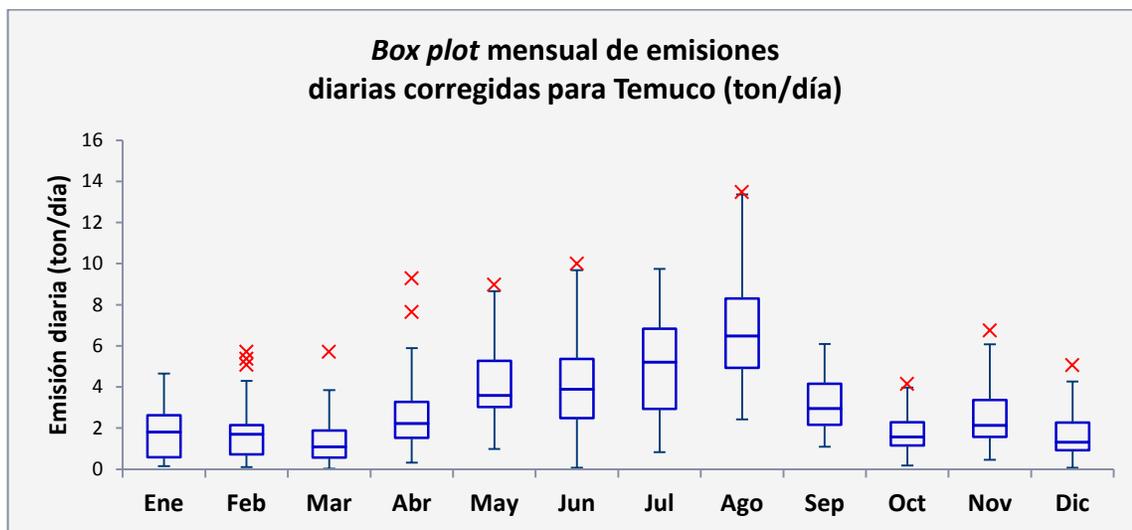


Figura V.10: *Box plot* mensual de las emisiones diarias corregidas para la comuna de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

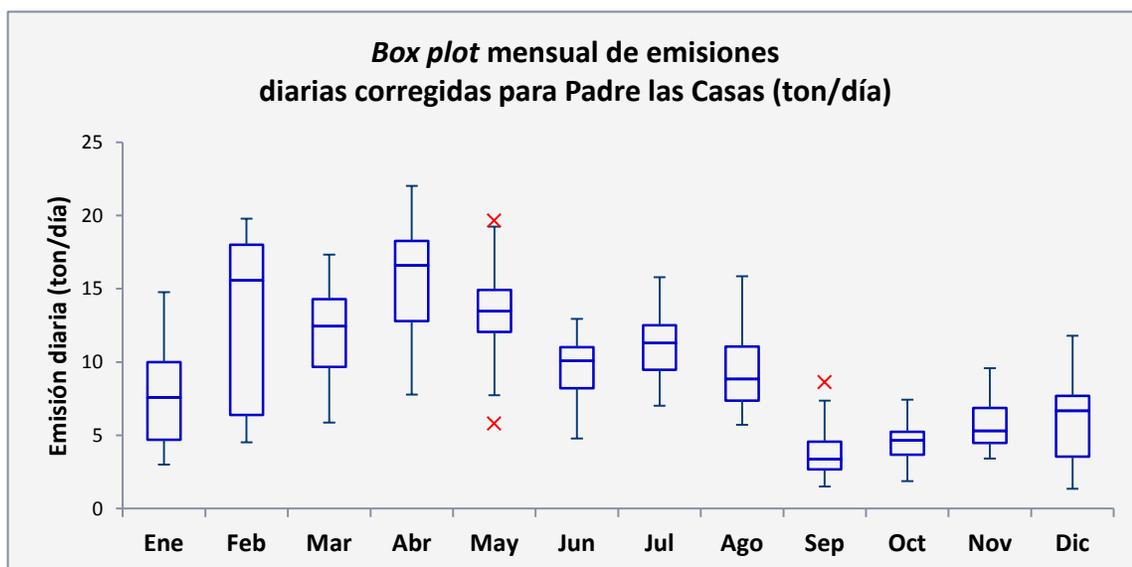


Figura V.11: *Box plot* mensual de las emisiones diarias corregidas para la comuna de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

La máxima media mensual de emisiones diarias corregidas se obtuvo para Temuco en el mes de Agosto, correspondiendo ésta a 6,8 ton/día, mientras que para la comuna de Padre las Casas ella se obtuvo en Abril, correspondiendo a 15,8 ton/día. La mínima media mensual obtenida, por su parte, correspondió a 1,3 ton/día para la comuna de Temuco en el mes de Marzo, y a 3,8 ton/día para Padre las Casas en el mes de Septiembre.

Las emisiones totales mensuales originales y las corregidas por medio de la modelación inversa se presentan en la Tabla V.7, donde se pueden observar de manera más global las correcciones a realizar a los inventarios. Dicha corrección considera una importante disminución de las emisiones de la comuna de Temuco, sin embargo, considera un aumento prácticamente igual en toneladas para Padre las Casas, generando así un aumento del inventario total de sólo 49 toneladas, valor que corresponde a un aumento de apenas el 1% de las emisiones originalmente ingresadas. Lo anterior indica que las emisiones totales originales se encontraban bien estimadas, sólo que su distribución entre ambas comunas era incorrecta.

Tabla V.7: Emisiones totales mensuales originales y corregidas con modelación inversa para ambas comunas y para el total.

Emisiones (ton)	Temuco		Padre las Casas		Total	
	Originales	Corregidas	Originales	Corregidas	Originales	Corregidas
Enero	162	57	88	240	250	297
Febrero	146	53	79	373	226	426
Marzo	272	41	162	370	434	412
Abril	263	81	156	473	420	554
Mayo	272	126	162	414	434	540
Junio	310	124	193	288	503	412
Julio	320	154	199	343	519	498
Agosto	320	210	199	292	519	502
Septiembre	196	97	111	115	307	212
Octubre	202	55	115	140	317	194
Noviembre	196	76	111	175	307	251
Diciembre	162	51	88	184	250	235
Total anual	2.822	1.125	1.663	3.409	4.485	4.534

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se calcularon los factores de corrección diarios f a aplicar a las emisiones originales para obtener las emisiones óptimas, es decir; $f_i = \frac{\hat{X}_i}{X_{ai}}$. El *box plot* de la Figura V.12 presenta la distribución de los factores diarios para todo el año para ambas comunas.

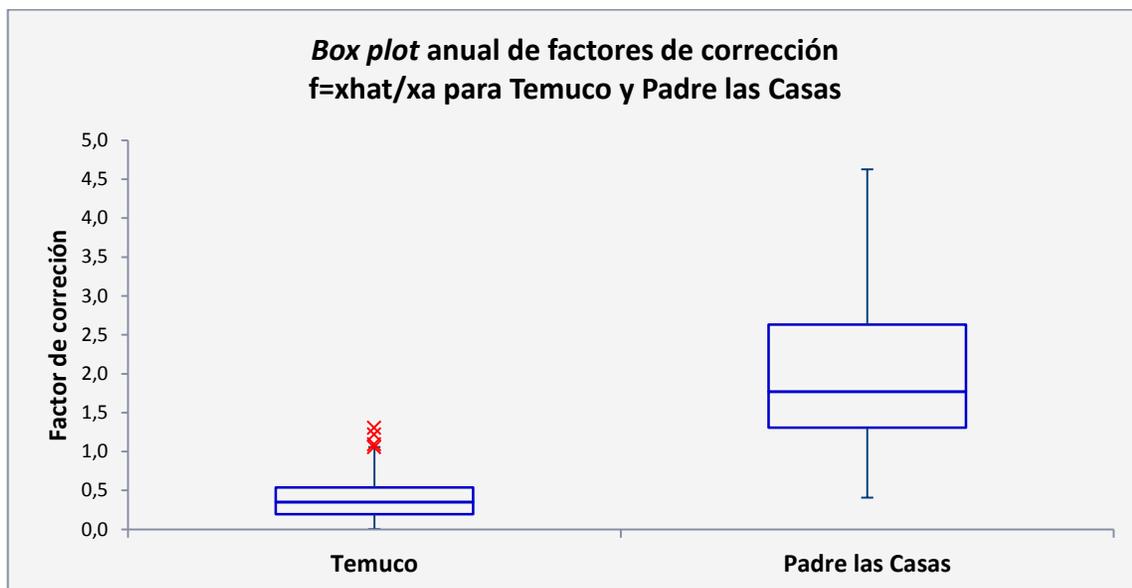


Figura V.12: *Box plot* anual de los factores de corrección $f = \frac{\hat{x}}{X_a}$ obtenidos de los resultados generados con CALPUFF para las comunas de Temuco y Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

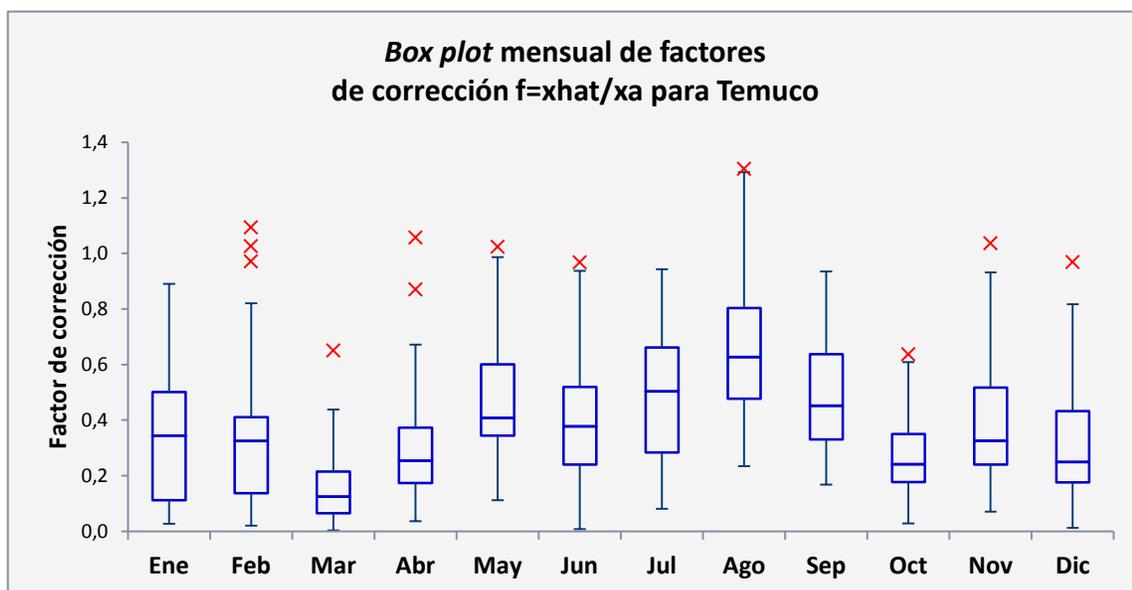
En la Tabla V.8 se presentan las estadísticas de los factores de corrección diarios para ambas comunas, manifestándose de esta forma que, en promedio, las emisiones de la comuna de Temuco ingresadas a CALPUFF deben ser disminuidas a menos de la mitad de lo original pues se encontraban sobreestimadas (factor de corrección medio menor a la unidad) y las de Padre las Casas aumentarse a más del doble para suplir la subestimación original (factor de corrección medio mayor a la unidad), llegando en algunos casos a corregirse por un factor cercano a 7.

Tabla V.8: Estadísticas de los factores diarios de corrección de la emisión para ambas comunas.

Factores de corrección $f = \frac{\hat{x}}{X_a}$	Temuco	Padre las Casas
Media anual	0,39	2,14
Desviación estándar	0,25	1,26
Mínimo	0,003	0,41
Máximo	1,30	7,00

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura V.13 y Figura V.14 se presentan las distribuciones de los factores de corrección mensuales para ambas comunas.

Figura V.13: *Box plot* mensual de los factores de corrección para la comuna de Temuco.

Fuente: Elaboración propia.

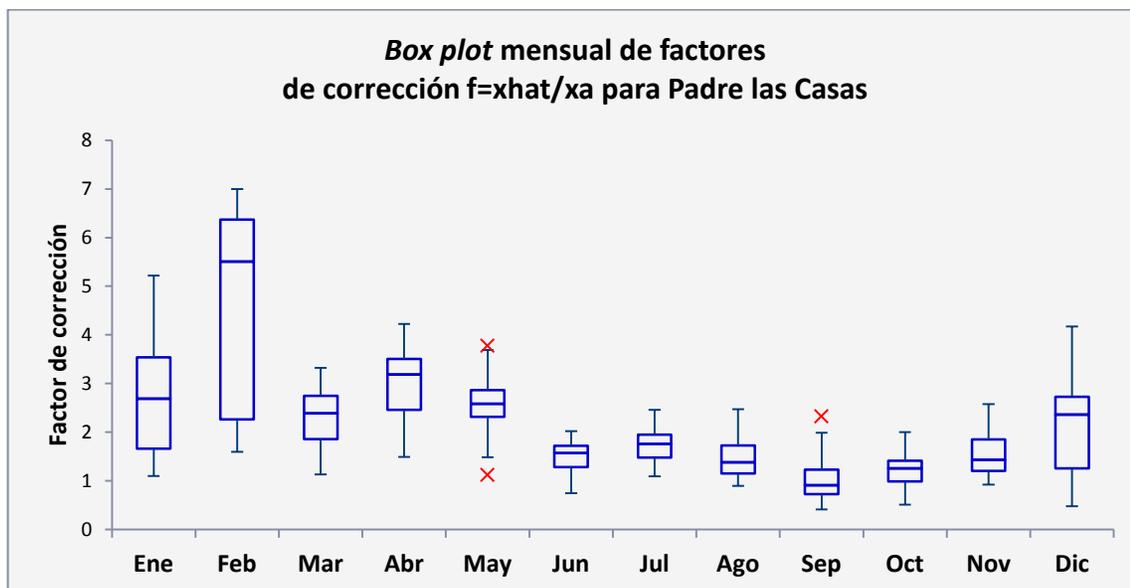


Figura V.14: *Box plot* mensual de los factores de corrección para la comuna de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores de las medias mensuales de los factores de corrección de ambas comunas se observa que para Temuco, el mes donde más se deben disminuir las emisiones originales a ingresar a CALPUFF, corresponde al mes de Marzo, debiendo éstas ser disminuidas a un 15% de su valor original ya que se encontraban muy sobrestimadas para este mes. Por otro lado, el mes donde se debería realizar la menor corrección de emisiones, corresponde al mes de Agosto, donde las emisiones originales se deben disminuir a aproximadamente un 65% de su valor original.

Para las emisiones de la comuna de Padre las Casas en cambio, el mes donde mayores correcciones en promedio se deben realizar corresponde al mes de Febrero, donde se deberían aumentar éstas a casi cinco veces su valor original, mientras que el mes donde menores correcciones en promedio se deben realizar corresponde al mes de Septiembre, donde se deben aumentar las emisiones en sólo un 3%.

La gran diferencia del factor medio de Febrero con los del resto del año se debe principalmente a que las concentraciones observadas muestran una rápida

tendencia al alza durante el mes de Enero y los primeros diez días de Febrero, alcanzando un máximo local, y una rápida caída hasta finales de Febrero (Ver Anexo C), razón que genera la alta dispersión de los datos de este mes, por lo que se deben aumentar las emisiones ingresadas a CALPUFF significativamente para lograr estas concentraciones. Si se calcula el factor de corrección anual de Padre las Casas descartando los valores correspondientes a Febrero, éste disminuye de 2,2 a 1,9 y el mes con mayores correcciones promedio a realizar pasa a ser Abril con un factor mensual medio de 3.

Luego, la metodología entrega mayores emisiones en Padre las Casas que en Temuco. Esto se puede explicar considerando que el polígono usado como Padre las Casas es habitado por población de menores ingresos, por lo que es posible que los equipos de combustión que allí se usan sean más anticuados, menos eficientes y más contaminantes que los usados en Temuco. Además, se puede considerar que en Padre Las Casas se usa leña no solo para calefacción, sino también para otros fines como cocinar alimentos, cosa que en general no ocurre en Temuco, donde la leña se emplea mayoritariamente en calefacción.

Con respecto a la desviación estándar de los factores de corrección diarios obtenidos para cada mes, se obtuvo que para Temuco la mayor dispersión de los datos se produce en el mes de Febrero y la menor en el mes de Marzo. Padre las Casas, por su parte, también presenta la mayor dispersión de datos en el mes de Febrero, por los motivos anteriormente explicados, y la menor en el mes de Octubre.

5.2.2. Concentraciones

Por otro lado, de la modelación inversa se obtuvieron las concentraciones a posteriori calculadas por el método, es decir, las concentraciones generadas por las emisiones óptimas calculadas por el método, o simplemente concentraciones óptimas.

Para poder comparar las concentraciones obtenidas de la modelación inversa con las observadas, se les agregó a las primeras la componente de *background* correspondiente a las emisiones producidas fuera de las comunas de Temuco y Padre las Casas, es decir, se les agregó el *background* regional y el suburbano.

La Figura V.15 muestra los resultados obtenidos para el receptor de la comuna de Temuco, donde se observa, para los días en los que se contaba con concentraciones observadas, que los valores a posteriori entregados por el filtro con el *background* incorporado (promedio anual de $49,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) logran representar bastante bien a las concentraciones observadas (promedio anual de $48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por lo que su desempeño para esta comuna es bastante efectivo, a excepción de sólo un evento de concentraciones altas de MP_{10} hacia finales del año que el método no alcanzó a representar. Con respecto al percentil 98 de los valores a posteriori incorporando el *background*, se encontró que era levemente inferior al de las concentraciones observadas, correspondiendo éste a $172 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el de las observaciones correspondía a $174 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que ambos superaban la norma diaria.

En general las concentraciones a posteriori con el *background* incorporado tienden a sobrestimar levemente a las observadas ($+0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual), observándose la mayor sobrestimación mensual promedio durante el mes de Marzo ($+4,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la mayor subestimación de las observaciones durante el mes de Diciembre ($-2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), principalmente debido al evento de alto impacto que el filtro no logró representar.

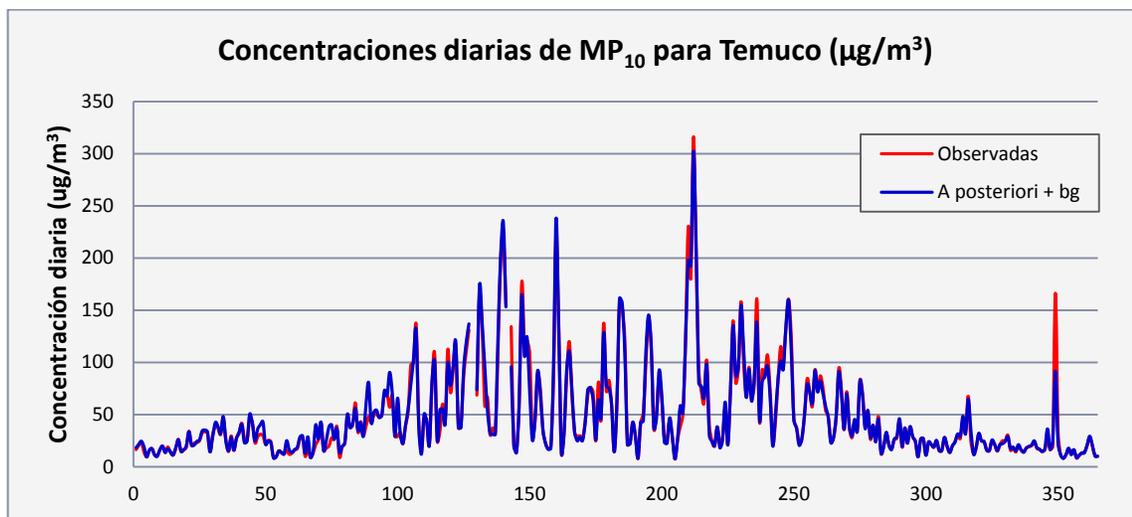


Figura V.15: Concentraciones diarias de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la estación de monitoreo de Temuco. En rojo: observaciones y en azul: estimaciones a posteriori u óptimas más el *background* total.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura V.16 se presentan los resultados obtenidos para el receptor de la comuna de Padre las Casas, donde se aprecia que los valores a posteriori entregados por el filtro más el *background* regional (promedio anual de $34,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en general subestiman a las concentraciones observadas (promedio anual de $38,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), observándose la mayor subestimación mensual promedio durante el mes de Mayo ($-11,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), principalmente debido a la insuficiencia de las correcciones del filtro para representar cuatro eventos de altas concentraciones observados, y una leve sobrestimación durante el mes de Septiembre ($+0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$), donde el modelo logra representar muy bien a las concentraciones observadas. El percentil 98 de los valores a posteriori encontrados, incorporando el *background*, correspondió a $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el de las concentraciones observadas correspondía a $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$, diferencia debida a la anteriormente mencionada insuficiencia del filtro para representar algunos eventos de altas concentraciones observadas.

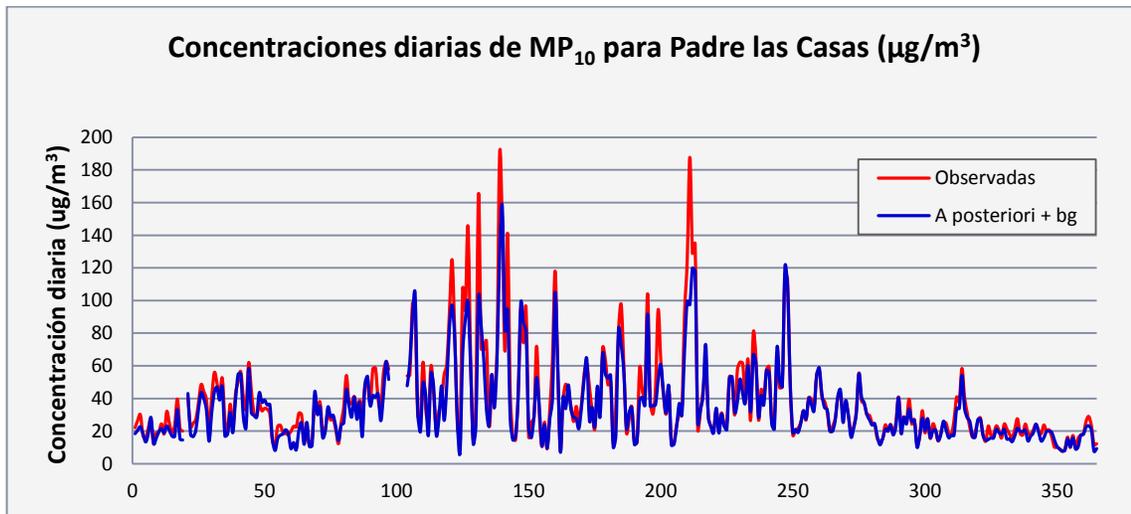


Figura V.16: Concentraciones diarias de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la estación de monitoreo de Padre las Casas. En rojo: observaciones y en azul: estimaciones a posteriori u óptimas más el *background* total.
Fuente: Elaboración propia.

Además, para ambas comunas se observa que la variabilidad de los datos aumenta durante los meses fríos, principalmente debido a las mayores emisiones que existen en dicho período, que generan altas concentraciones, pero que pueden disminuir drásticamente debido a las frecuentes lluvias presentes en esa época del año.

En cuanto a los grados de libertad diarios del sistema, es decir, la cantidad de estaciones para las que se pueden estimar las concentraciones correctamente por medio del filtro de Kalman para un día y que, en esta Tesis, pueden tomar valores entre cero y dos, fueron calculados dentro del mismo código de MATLAB[®], obteniéndose los valores diarios mostrados en la Figura V.17 y cuyo valor promedio correspondió a 1,14 estaciones/día.

Esta es una manera de presentar la significancia estadística de los resultados de la aplicación del filtro de Kalman en esta simulación base. Existen unos pocos días en que no es posible estimar una emisión con significancia, pero la mayor parte del tiempo se puede estimar más de una emisión diaria con significancia estadística.

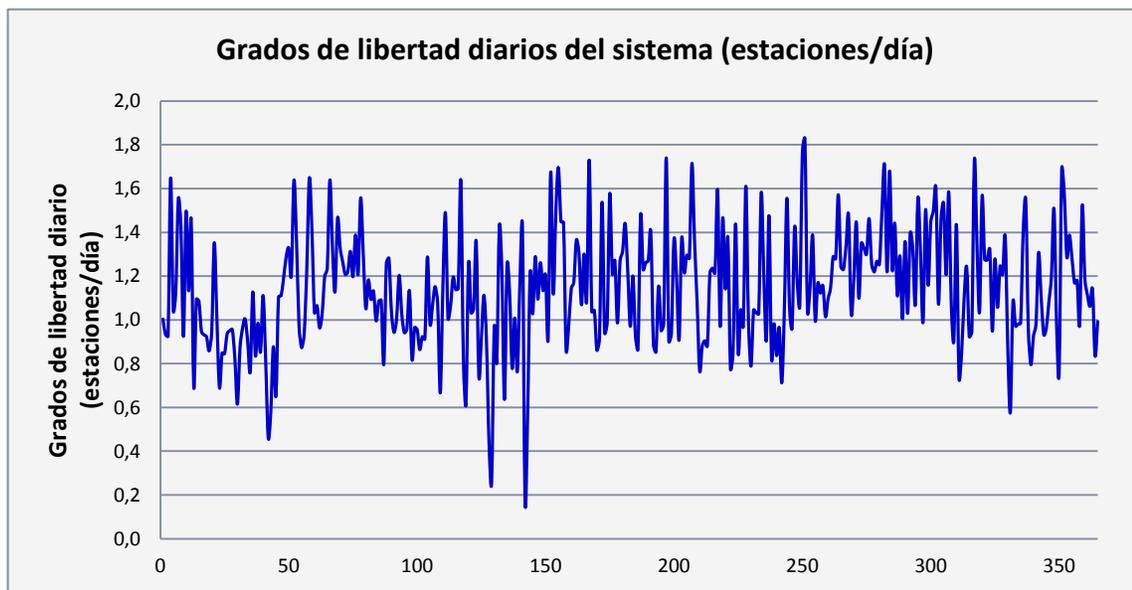


Figura V.17: Grados de libertad del sistema para el año 2006 (estaciones/día).
Fuente: Elaboración propia.

Además, se realizó el análisis estadístico entre las concentraciones observadas y las corregidas por el filtro, incorporando el *background* total, para ambas comunas, cuyos resultados se presentan en la Tabla V.9.

Tabla V.9: Resultados del análisis estadístico de las concentraciones observadas y las corregidas por el filtro, incorporando el *background*, para ambas comunas.

	Temuco	Padre las Casas
Concentración media observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	48,8	38,5
Concentración media modelada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49,0	34,6
Percentil 98 observado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	174,5	128,2
Percentil 98 modelado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	171,8	103,9
Desviación estándar de lo observado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44,1	27,9
Desviación estándar de lo modelado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	43,1	23,4
Concentración media del residual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0,2	3,9
Diferencia media normalizada (%)	-0,4	10,0
Error cuadrático medio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8,1	10,8
Error cuadrático medio sistemático ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17,9	18,3
Error cuadrático medio no sistemático ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19,3	15,7
Coefficiente de correlación	0,98	0,93
Índice de evaluación	0,99	0,95
Pendiente b	0,96	0,79
Intercepto a ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,16	4,37

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla anterior se observa que los datos de ambas comunas presentan un muy buen desempeño; en promedio subestiman a las observaciones en aproximadamente un 5% (media de las diferencias medias normalizadas), siendo los datos de Temuco los que presentan un mejor desempeño (sobrestimación de apenas un 0,4%). Además, se obtuvieron índices de evaluación similares para ambas comunas, siendo éste muy cercano a la unidad. Lo anterior indica que las concentraciones

corregidas, más la componente del *background*, representan bien a las observaciones y que el modelo no presenta muchos sesgos. Además, si se comparan los valores de los parámetros estadísticos de la Tabla anterior con los obtenidos para los resultados de la simulación en CALPUFF (Tabla V.5), se observa que el desempeño general del modelo mejoró considerablemente con los resultados de la modelación inversa, por lo que se puede afirmar que la corrección de las emisiones realizada fue correcta. Por ejemplo, ahora el intercepto de la recta de las concentraciones observadas versus las simuladas con el *background* es muy similar para Temuco y Padre Las Casas, lo que era previsible de antemano pues corresponde a una medida del *background* regional anual de MP₁₀, sin embargo, en esta Tesis se ha estimado cuantitativamente.

5.2.3. Reducción de emisiones para el cumplimiento de la normativa ambiental del MP₁₀

Los porcentajes mínimos en los que se deberían reducir las emisiones corregidas de los polígonos de Temuco y Padre las Casas para cumplir con las diferentes normativas analizadas, fueron calculados, como se mencionó anteriormente en la metodología, para dos escenarios diferentes, cuyos resultados se presentan a continuación.

i) Reducción de las emisiones corregidas del polígono correspondiente a Temuco:

Los porcentajes mínimos en los que se debían reducir las emisiones corregidas del polígono de Temuco para obtener concentraciones bajo las normativas presentadas en la Tabla IV.9, se presentan en la Tabla V.10, junto a la reducción neta de emisiones que dicho porcentaje representa.

Tabla V.10: Porcentajes mínimos en los que se deben reducir las emisiones corregidas del polígono de Temuco para cumplir con las normas diaria y anual, en los niveles de saturación y latencia (%). Entre paréntesis se presenta la reducción que dicho porcentaje representa (ton/año).

Reducción de emisiones	Saturación	Latencia
Norma diaria	30% (337 ton/año)	70% (787 ton/año)
Norma anual	0% (0 ton/año)	46% (517 ton/año)

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones obtenidas en los receptores de Temuco y Padre las Casas para el caso correspondiente a que la ciudad de Temuco deje de ser zona saturada, es decir, que el polígono de Temuco reduzca en un 30% sus emisiones corregidas, se presentan en la Tabla V.11 (ver las concentraciones para los demás casos en Anexo G). Se debe mencionar que las concentraciones obtenidas se encuentran justo en el límite para dar cumplimiento a la norma correspondiente, debido a que fueron calculadas con esa restricción, por lo que una reducción mayor generaría aún menores concentraciones que las calculadas en ambos receptores.

Tabla V.11: Concentraciones obtenidas en los receptores de ambas comunas al disminuir las emisiones corregidas de Temuco en un 30%.

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temuco	Padre las Casas
Percentil 98	149	99
Media anual	43	33

Fuente: Elaboración propia.

- ii) Reducción de las emisiones corregidas de los polígonos correspondientes a Temuco y Padre las Casas:

Para el segundo escenario definido, se presentan en la Tabla V.12 los porcentajes mínimos en los que se debían reducir las emisiones corregidas de los polígonos de Temuco y Padre las Casas para dar cumplimiento a las normativas analizadas y la reducción neta de emisiones que dicho porcentaje representa.

Tabla V.12: Porcentajes mínimos en los que se deben reducir las emisiones corregidas de los polígonos de Temuco y Padre las Casas para cumplir con las normas diaria y anual, en los niveles de saturación y latencia (%). Entre paréntesis se presenta la reducción que dicho porcentaje representa (ton/año).

Reducción de emisiones	Saturación	Latencia
Norma diaria	18% (816 ton/año)	47% (2.131 ton/año)
Norma anual	0% (0 ton/año)	30% (1.360 ton/año)

Fuente: Elaboración propia.

A su vez, en la Tabla V.13 se presentan las concentraciones obtenidas en Temuco y Padre las Casas para el caso de una reducción del 18% de las emisiones corregidas totales, donde para Temuco se obtienen las mismas concentraciones que las obtenidas con la reducción del 30% de las emisiones corregidas de Temuco, pero para Padre las Casas se obtienen concentraciones levemente inferiores (ver las concentraciones para los demás casos en Anexo G).

Tabla V.13: Concentraciones obtenidas en los receptores de ambas comunas al disminuir las emisiones corregidas de Temuco y Padre las Casas en un 18%.

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temuco	Padre las Casas
Percentil 98	149	90
Media anual	43	31

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que los problemas de calidad del aire se han manifestado casi exclusivamente en la comuna de Temuco, para cumplir la normativa sería técnicamente más efectivo reducir sólo allí las emisiones, puesto que la cantidad de toneladas necesarias de reducir de esta forma sería menor bajo cualquiera de los criterios analizados en esta Sección. Lo anterior se debe a que las emisiones del polígono de Temuco tienen una contribución a las concentraciones registradas en éste casi siete veces mayor al impacto causado por las emisiones de Padre las Casas en el mismo receptor. Por ende, la solución que implica una menor reducción neta de emisiones corresponde a disminuir exclusivamente las emisiones del polígono de Temuco.

Sin embargo, desde el punto de vista económico, es plausible que en Padre Las Casas se presenten oportunidades de hacer sustituciones tecnológicas que sean mucho más costo-efectivas que en el caso de Temuco, donde su línea base de emisiones es menor debido a que se emplean estufas más modernas.

Para profundizar en este aspecto y para evaluar la factibilidad técnica de conseguir las reducciones netas de emisiones que se han estimado para alcanzar los niveles de latencia para ambos escenarios, se calculó el porcentaje en el que se debían reducir exclusivamente las emisiones debidas al consumo de leña para lograr dichas reducciones, presentados en la Tabla V.14.

Tabla V.14: Reducción de emisiones debidas a consumo de leña necesaria para alcanzar niveles de latencia de la norma diaria.

	Escenario 1	Escenario 2
Reducción neta necesaria (ton)	787	2.131
Emisiones por leña (ton)	706	2.847
Reducción necesaria (%)	111%	75%

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla anterior, se observa que resultaría imposible alcanzar la reducción necesaria para alcanzar el nivel de latencia reduciendo sólo las emisiones del consumo de leña de la comuna de Temuco (Escenario 1), sin embargo, para el Escenario 2 se observa que sería posible alcanzar dicha reducción de emisiones disminuyendo en un 75% las emisiones provenientes de exclusivamente el consumo de leña en ambas comunas.

Para analizar la factibilidad de alcanzar dicha reducción de las emisiones provenientes del consumo de leña, se utilizó la información presentada en la Tabla V.15, tomada de un estudio canadiense (Preto, 2005), donde entre paréntesis se muestra el porcentaje de reducción de emisiones que generaría el paso desde cada uno de los tipos de artefactos presentados a una estufa a pellets de madera.

Tabla V.15: Valores medidos de emisiones de diversos tipos de estufas a leña, en mg MP₁₀/MJ, y el porcentaje de reducción de emisiones que se obtendría al pasar desde cada uno de los artefactos presentados a una estufa a pellets de madera (%).

Tipo de estufa	Combustión lenta (1,5 kg/h)	Combustión rápida (3 kg/h)
Convencional, sin doble cámara, recubrimiento refractario parcial	3.500 (99%)	1.200 (98%)
Convencional, baffle antes de la salida de gases, recubrimiento refractario parcial	1.700 (99%)	250 (92%)
Moderna, con baffle, 100% de recubrimiento refractario y control de entrada de aire ('doble cámara')	750 (97%)	180 (89%)
Estufa a pellets de madera	80 (75%)	20 (0%)

Fuente: Preto (2005).

Como se puede apreciar de la Tabla anterior, con un cambio a estufas a pellets de madera es posible alcanzar altos porcentajes de reducción de emisiones provenientes del uso de leña como combustible, siendo éstos mayores o igual al porcentaje de reducción de dichas emisiones necesario para cumplir con el nivel de latencia de la norma. Las estufas a pellets de aserrín están actualmente disponibles en el mercado nacional, y su mejor eficiencia energética y consecuente ahorro en costos constituyen el incentivo para que las personas opten por esta tecnología menos contaminante.

Por último, un aspecto que también ayudaría a reducir las emisiones debidas al consumo de leña corresponde a la mejora de la aislación térmica presente en las viviendas de la zona que, dependiendo del estado inicial de las viviendas y de las medidas que se tomen, podría llegar a generar ahorros energéticos desde un 5 a un 80%. Dicho aspecto se encuentra considerado en el PDA, donde se establece que el Gobierno Regional junto a la CONAMA gestionarán recursos para difundir y

promover tecnologías alternativas y de bajo costo de aislación de viviendas y de uso eficiente de la energía.

5.3. Simulación de Monte Carlo

Para analizar la sensibilidad de los resultados de la modelación inversa, se realizó una simulación de Monte Carlo en MATLAB[®] que consideraba la realización de 5.000 modelaciones inversas con diferentes valores aleatorios de los tres parámetros mencionados anteriormente en las Secciones 3.3 y 4.3; a continuación se presentan los resultados obtenidos correspondientes a las emisiones.

Para cada comuna se obtuvieron 5.000 valores de emisiones corregidas por cada día, sin embargo, para efectos de resultados, se trabajó con las medias diarias (Figura V.18 y Figura V.19, donde se comparan los resultados de Monte Carlo con los obtenidos de la modelación inversa) y desviaciones estándar diarias (Figura V.20). En adelante las medias de las emisiones diarias corregidas serán consideradas simplemente como las emisiones diarias corregidas obtenidas de la simulación de Monte Carlo.

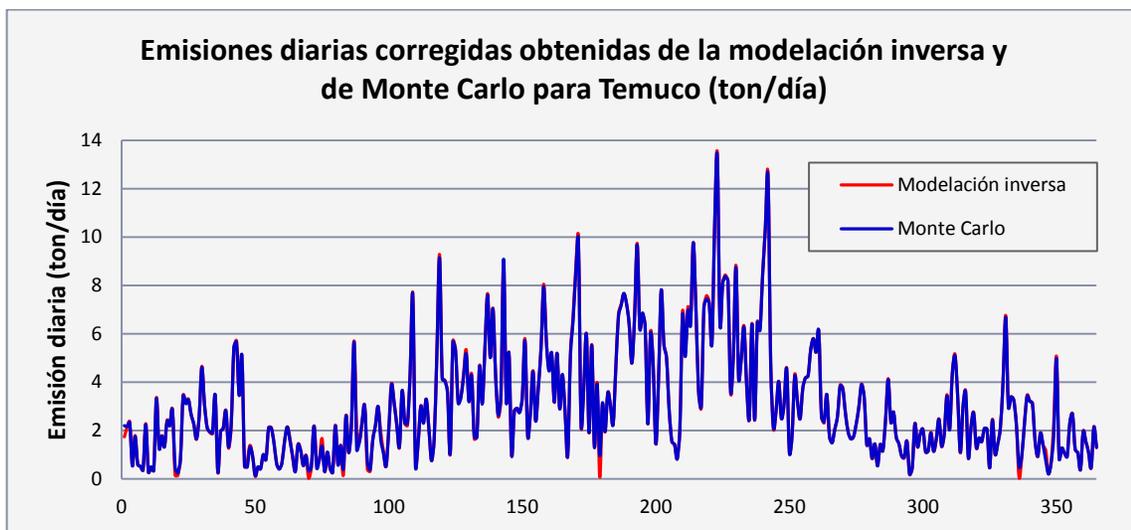


Figura V.18: Emisiones diarias corregidas por modelación inversa y Monte Carlo para Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

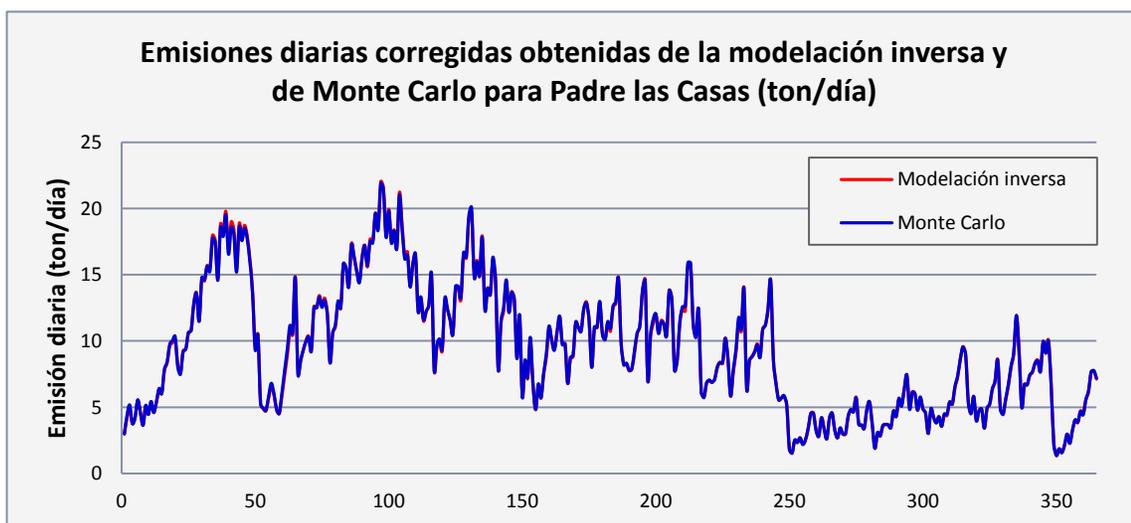


Figura V.19: Emisiones diarias corregidas por modelación inversa y Monte Carlo para Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

El total de emisiones corregidas anuales obtenido de la simulación de Monte Carlo correspondió a 1.120 ton/año para la comuna de Temuco y a 3.411 ton/año para

Padre las Casas, siendo las emisiones diarias mostradas en las Figuras anteriores prácticamente las mismas a las obtenidas por medio de la modelación inversa inicial (Ver Figura V.9), es decir se volvió a obtener una corrección del inventario original de -60% para Temuco y de +105% para Padre las Casas.

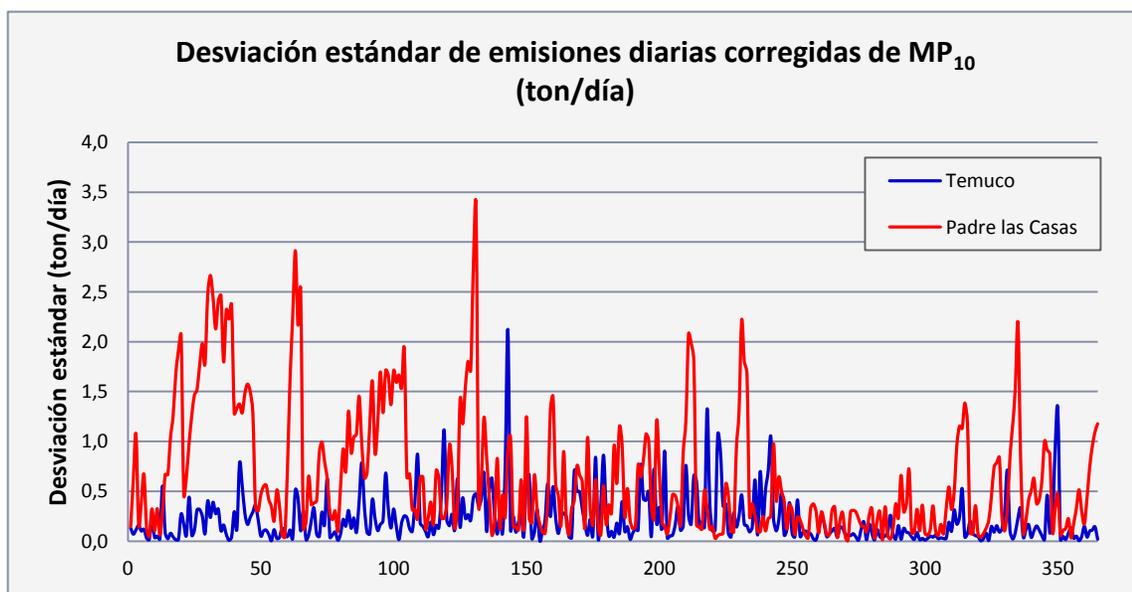


Figura V.20: Desviaciones estándar diarias de las emisiones diarias corregidas de MP₁₀ obtenidas de la simulación de Monte Carlo para Temuco y Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

Las medias anuales de las emisiones diarias corregidas para ambas comunas, obtenidas con Monte Carlo, fueron las mismas que las obtenidas con la modelación inversa (Ver Tabla V.6), correspondiendo éstas a 3,1 y 9,3 ton/día para Temuco y Padre las Casas respectivamente.

Además, para apreciar la distribución mensual de las emisiones corregidas para cada comuna, en la Figura V.21 y Figura V.22 se presentan los respectivos *box plots* mensuales de dichos datos, que resultaron ser prácticamente idénticos a los obtenidos de la modelación inversa presentados en la Figura V.10 y Figura V.11.

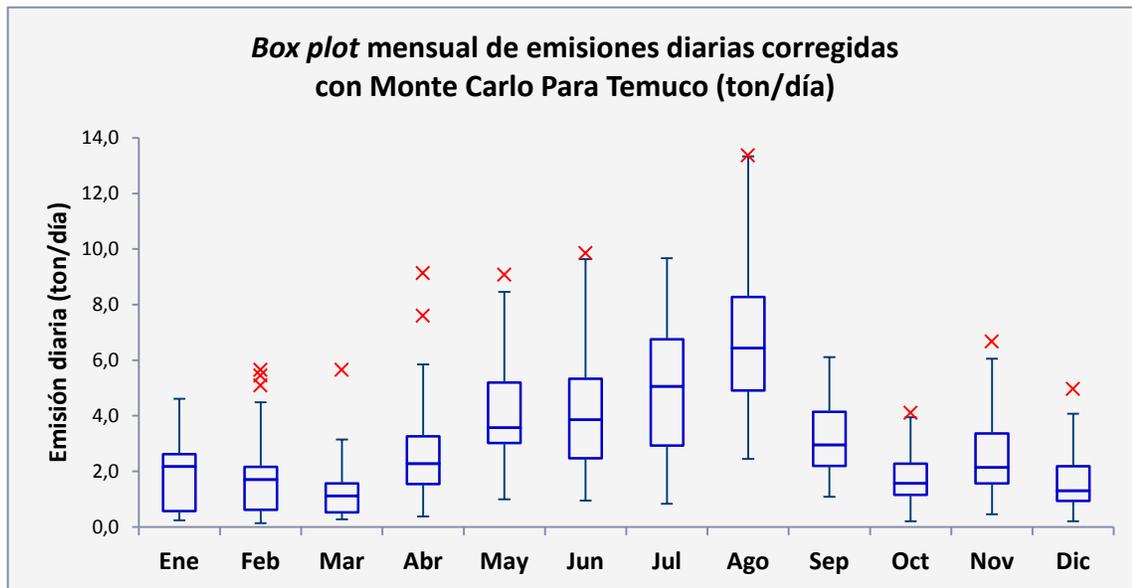


Figura V.21: *Box plot* mensual de las emisiones diarias corregidas obtenidas con Monte Carlo para la comuna de Temuco.

Fuente: Elaboración propia.

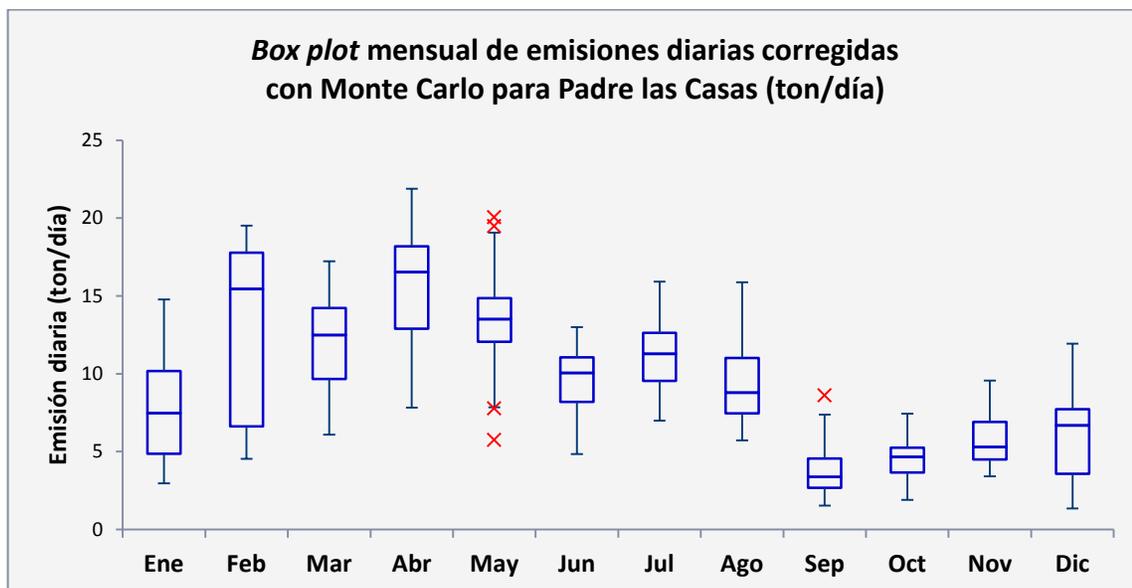


Figura V.22: *Box plot* mensual de las emisiones diarias corregidas obtenidas con Monte Carlo para la comuna de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

La media mensual mínima de emisiones diarias corregidas con Monte Carlo fue la misma que se obtuvo con la modelación inversa, correspondiendo a 1,3 ton/día para la comuna de Temuco en el mes de Marzo y a 3,8 ton/día para Padre las Casas en el mes de Septiembre, mientras que la media mensual máxima para Temuco fue sólo 0,1 ton/día menor que la obtenida para la modelación inversa, correspondiendo a 6,7 ton/día para Agosto, y, por último, para Padre las Casas se mantuvo en el mes de Abril, pero también bajó 0,1 ton/día obteniéndose un valor de 15,7 ton/día.

Por otro lado, para obtener un indicador de la dispersión de los resultados de emisiones obtenidos para cada día, se calcularon los coeficientes de variación $c_v = \frac{\sigma}{\mu}$ diarios para cada comuna mostrados en la Figura V.23. Dichos coeficientes evidencian a grandes rasgos si una distribución de probabilidad tiene mucha o poca variabilidad, dependiendo si es mayor o menor a uno respectivamente, y, en un grado de mayor detalle, si el coeficiente es mayor a 0,5, su valor es o no estadísticamente significativo.

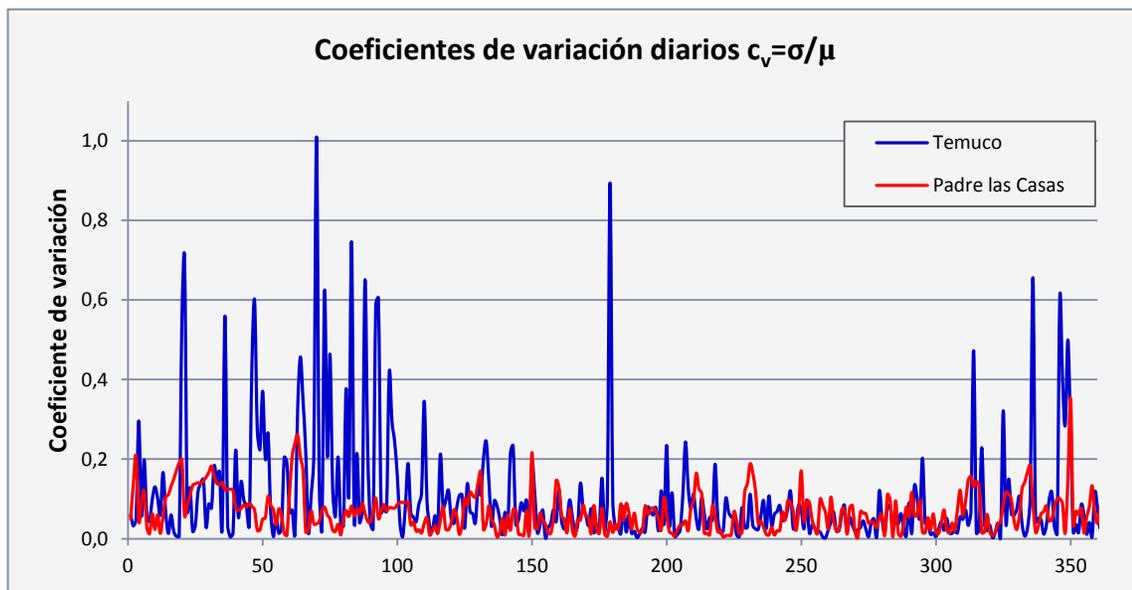


Figura V.23: Coeficientes de variación $c_v = \frac{\sigma}{\mu}$ diarios para Temuco y Padre las Casas.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura anterior se observa que la mayoría de los coeficientes de variación diarios de ambas comunas tienen valores menores a 0,4, por lo que se puede afirmar que los resultados obtenidos con la simulación de Monte Carlo tienen baja variabilidad para cada día, siendo la comuna de Padre las Casas la que presenta la menor variabilidad, pese a que las desviaciones estándar de sus emisiones son mayores que en Temuco (ver Figura V.20). Además, los resultados de ambas comunas pueden ser considerados mayoritariamente como significativos por presentar valores medios menores a 0,5, correspondiendo los valores medios a 0,10 para Temuco y 0,07 para Padre las Casas. Sólo en Temuco se presentan algunos días con emisiones estimadas que no son estadísticamente significativas.

La distribución anual de dichos valores para ambas comunas se presenta en el *box plot* de la Figura V.24, donde se constata que más de tres cuartos de los coeficientes de variación de Temuco y todos los de Padre las Casas son inferiores a 0,4, siendo además los valores máximos de Temuco inferiores a uno, a excepción de uno, por lo que se confirma la estabilidad de todos los valores diarios obtenidos de la simulación de Monte Carlo y la significancia de más del 88% de ellos.

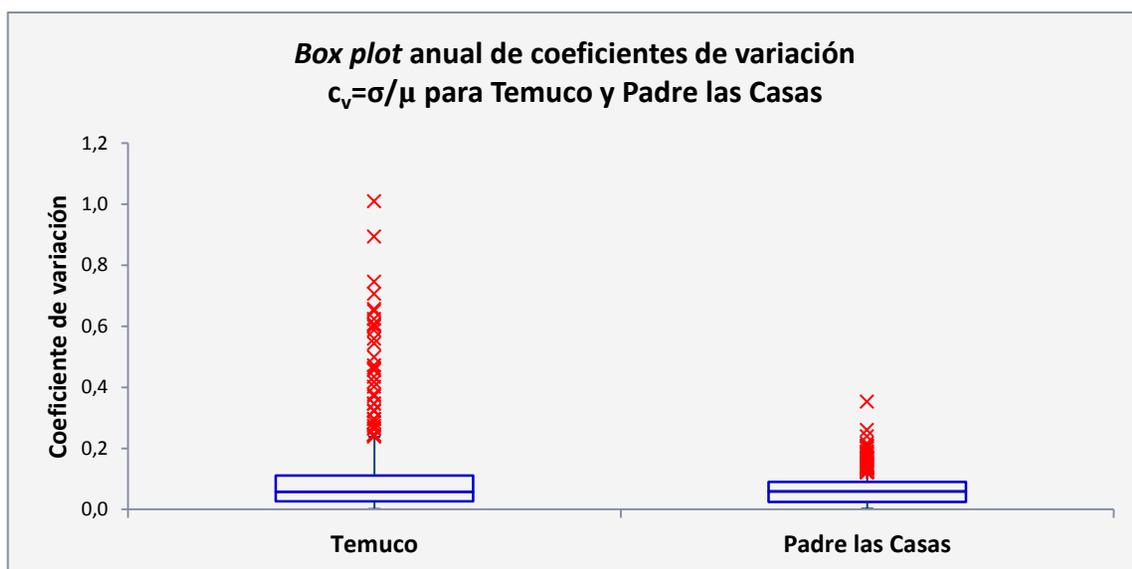


Figura V.24: *Box plot* anual de los coeficientes de variación $c_v = \frac{\sigma}{\mu}$ obtenidos de los resultados de la modelación de Monte Carlo para las comunas de Temuco y Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

Se debe mencionar que de los factores de corrección diarios $f_i = \frac{\hat{x}_i}{X_{ai}}$ calculados para las emisiones corregidas obtenidas con Monte Carlo, se obtuvieron las mismas medias anuales que las obtenidas de la modelación inversa; 0,4 para Temuco y

2,1 para Padre las Casas, lo que confirma la robustez de los resultados obtenidos de la modelación inversa inicial.

VI. CONCLUSIONES

Al igual que en los capítulos anteriores, aquí se presentarán las conclusiones obtenidas en el desarrollo de esta Tesis para cada uno de los procedimientos desarrollados, considerando la simulación en el sistema de modelación CALPUFF; la evaluación del inventario base en la zona urbana, la modelación inversa utilizada para corregir las deficiencias de dicho inventario, y el análisis del cumplimiento de las normas ambientales del MP_{10} , además de algunas sugerencias y conclusiones generales.

6.1. Simulación en el sistema de modelación CALPUFF

La realización de la simulación en CALPUFF, primero que todo, permitió manejar en forma sencilla la información desagregada con la que se contaba de los inventarios de emisiones de la ciudad de Temuco, en un inventario de emisiones que considera fuentes puntuales, móviles y de área conjuntamente. Además, permitió evaluar el comportamiento de las emisiones de MP_{10} de la ciudad, por medio de una simulación en un software autorizado para ello por la EPA, lo que no se había realizado anteriormente con este inventario.

Del análisis estadístico realizado a los resultados obtenidos de la simulación base en CALPUFF, se obtuvo que el modelo representa bien la variabilidad meteorológica en la zona, ya que las concentraciones simuladas son muy similares a las observadas (índice de evaluación alto, igual a 0,87).

La simulación base realizada en CALPUFF también indicaba qué correcciones globales debían realizarse al inventario de emisiones. Sin embargo, cabe hacer notar que esas correcciones globales, en caso de ingresarse al inventario para corregirlo, solo corrigen la media de las concentraciones, pero no son capaces de corregir el desempeño del modelo para poder representar valores extremos (altos y

bajos) de las concentraciones observadas. Para tomar en cuenta la variabilidad diaria, necesariamente se debía aplicar la metodología de modelación inversa.

6.1.1. Opciones de mejoramiento de la simulación

Un primer aspecto para aumentar la calidad de los resultados de la simulación consiste en mejorar la calidad de la información en altura ingresada al modelo CALPUFF, ya que en esta Tesis se debieron utilizar datos correspondientes a la ciudad de Puerto Montt por ser éste el radiosondeo más cercano. Esto podría introducir errores a la simulación, los cuales son difíciles de evaluar justamente porque no hay radiosondeo disponible en la zona. Una solución consistiría en hacer simulaciones de la meteorología, aplicando modelos de meso-escala como MM5 o WRF, ya que es probable que no se aumente la cantidad de radiosondeos en el país, al menos en el mediano plazo. Otra alternativa económica consistiría en instalar sensores meteorológicos en los cerros cercanos a la ciudad, a distintas cotas, para capturar la inversión térmica, por ejemplo.

Otro aspecto que mejoraría la calidad de la simulación sería medir a cuánto corresponde verdaderamente el *background* regional del MP_{10} en las masas de aire que ingresan a la zona urbana diariamente, para poder así comparar las concentraciones simuladas, incluyendo dichos valores de *background* regional, con las concentraciones observadas en el monitoreo ambiental. Para realizar esto se necesitarían al menos dos puntos de monitoreo, uno al Suroeste y otro hacia el Noreste de la zona urbana, de acuerdo con la dirección predominante de los vientos, para posteriormente aplicar un modelo de receptor a las concentraciones de MP_{10} medidas en la ciudad (Jorquera, 2008).

Ambas alternativas conseguirían mejorar el modelo lineal dado por la Ecuación (4.5), usado tanto para la modelación inversa como para el ajuste de emisiones en la construcción de escenarios de cumplimiento de la normativa medioambiental.

Finalmente, otro aspecto que mejoraría la simulación sería emplear algún modelo de dispersión Euleriano fotoquímico (como CAMx, CMAQ, WRF-Chem, entre otros) combinándolo con un ajuste de emisiones de precursores de ozono y MP secundario mediante modelación inversa, para verificar los valores estimados en la presente Tesis. Pese a que esta opción tiene requerimientos de información mucho más amplios que en el caso de CALPUFF, su ventaja potencial corresponde a que permitiría estimar la generación de material particulado secundario y determinar qué tan relevante es dicho aporte en las comunas de Temuco y Padre Las Casas.

6.2. Modelación inversa, mediante filtro de Kalman

Con la modelación inversa se buscaba corregir el inventario de emisiones de la ciudad de Temuco, haciendo una asimilación de los datos observados del monitoreo ambiental del MP_{10} . Así, al contar con un inventario de emisiones correcto y validado para la zona, será posible enfocar en la dirección correcta las medidas a realizar para disminuir la contaminación y por ende sus efectos nocivos sobre la salud de la población. Además, usando como base un inventario de emisiones correcto, se pueden realizar simulaciones que permitan evaluar con mayor precisión los efectos en las concentraciones de las diferentes medidas de reducción de emisiones que se desean tomar, para poder identificar de esta manera cuáles son las medidas más eficientes en términos de costos y beneficios.

Tal como se había estimado a partir de los resultados de la simulación realizada en CALPUFF, de la modelación inversa se obtuvieron inventarios de emisión corregidos correspondientes a 1.125 ton/año para el polígono de Temuco (un 40% del

valor original) y a 3.409 ton/año para el polígono de Padre las Casas (un 205% del original), obteniéndose un inventario corregido total para la ciudad de 4.534 ton/año, apenas un 1% mayor al valor base o a priori.

Por lo anterior se concluye que, pese a que se puede considerar que el inventario total de emisiones de la ciudad de Temuco se encontraba bien estimado, la asignación espacial de las emisiones no corresponde a la correcta, pues se encuentran mal distribuidas las emisiones entre ambas comunas. En la realización del inventario de fuentes de área hecho para Temuco las emisiones por consumo de leña fueron estimadas y se distribuyeron a partir del análisis de una encuesta específica hecha en la zona, por lo que es en dicho análisis donde puede estar la fuente del error en la asignación espacial de dichas fuentes de emisión.

Del análisis estadístico realizado entre las concentraciones observadas y las corregidas obtenidas de la modelación inversa (incluyendo la contribución del *background*), se comprueba que el método, al corregir el inventario de emisiones, también logra mejorar el desempeño de las concentraciones simuladas (el promedio de las diferencias medias normalizadas cambia de una sobreestimación del 28% de lo observado a una subestimación de sólo el 4,8% de lo observado, mientras que el índice de evaluación promedio aumenta de 0,87 a 0,97). Esto ocurre debido a que se obtiene un resultado más cercano a lo observado, lográndose de esta forma el objetivo de la modelación inversa: obtener de la simulación con las emisiones corregidas, concentraciones lo más similares posibles a las observadas, demostrándose de esta forma la efectividad de este procedimiento en la corrección de inventarios de emisiones.

Una manera de verificar el ajuste del inventario de emisiones y las correcciones requeridas para conseguir el cumplimiento de las normas sería realizar una nueva simulación en CALPUFF, usando datos meteorológicos y de monitoreo ambiental de otro año, para posteriormente comparar las concentraciones simuladas con las observadas en dicho año.

A modo de recomendación, se sugiere que las autoridades ambientales de la ciudad de Temuco realicen un estudio para verificar las causas que harían que las emisiones del polígono Padre las Casas sean tanto mayores que las del de Temuco. Esto con el fin de orientar las medidas establecidas para la reducción de emisiones, como las que dicta el PDA recientemente en vigencia, a los agentes que mayores emisiones generan en la ciudad (fuentes del polígono de Padre las Casas) y, por lo tanto, generar así un mayor impacto de dichas medidas sobre la calidad del aire de la ciudad. Para ello convendría hacer un análisis químico de los filtros de MP_{10} , seguido de un modelo de receptor, como se realizó en un estudio para Tocopilla (Jorquera, 2008), y realizar encuestas focalizadas en identificar los equipos de combustión de leña que se usan en ambas comunas, incluyendo sus patrones de uso.

Los resultados de la modelación inversa sugieren que se enfoquen las medidas de reducción de emisiones a las fuentes del polígono de Padre las Casas, sin embargo, dado que las mayores concentraciones de MP_{10} se han constatado en Temuco, hay que considerar escenarios de reducción de emisiones en ambos polígonos en conjunto. El análisis de las diferentes opciones: reducciones en Temuco solamente, o en Temuco y Padre Las Casas simultáneamente, indica que en el escenario más exigente (cumplir con la normativa ambiental diaria en el receptor de Temuco), habría que reducir en un 47% las emisiones totales de MP_{10} en ambas comunas (en el caso de considerar solamente reducciones en Temuco, el porcentaje sube a un 70%). Bajo dichos escenarios de reducción de emisiones también se cumpliría con la norma anual en ambas comunas, obteniéndose concentraciones bajo el nivel de latencia para el MP_{10} que corresponde a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Una revisión bibliográfica permitió estimar que es posible conseguir cambios tecnológicos en estufas a leña que permitan reducir considerablemente las emisiones del consumo residencial de este combustible y poder así cumplir con la normativa ambiental. Por ejemplo, en EEUU, se comercializan estufas catalíticas a leña con estándares de emisión de 2,5 g/h en zonas como el estado de Washington (Southwest Clean Air Agency, 2010), y las emisiones se pueden reducir aún más usando

estufas alimentadas con pellets de aserrín, con emisiones de MP_{10} tan bajas como de 20 a 80 mg/MJ (Preto, 2005).

Como en el mercado nacional se venden estufas con doble cámara de combustión y también alimentadas con pellets de aserrín, sería recomendable conocer sus estándares de emisión por medio de mediciones realizadas por algún laboratorio certificado para confirmar qué porcentaje de sustitución de equipos se requeriría para obtener la reducción de emisiones necesaria para cumplir con la normativa ambiental en Temuco y Padre Las Casas y, por ende, mejorar la calidad del aire de las comunas.

La metodología aplicada en esta Tesis se puede aplicar en otras zonas urbanas con similares problemas de calidad del aire, como Coyhaique, Osorno, Chillán, etc. Para esto se requiere seguir los pasos que se han documentado detalladamente en el presente documento.

6.3. Simulación de Monte Carlo

A partir de los resultados obtenidos de la simulación de Monte Carlo se concluye que la mayor parte de los resultados de la modelación inversa son resultados robustos y estadísticamente significativos. Específicamente, todas las emisiones estimadas en Padre Las Casas son estadísticamente significativas, mientras que sólo un pequeño porcentaje de las estimadas en Temuco no lo son.

BIBLIOGRAFÍA

Álamos Guzmán, M. C. (2010). *Corrección de inventarios de emisiones mediante modelación inversa, caso de estudio: Tocopilla, II Región*. Santiago.

CONAMA IX Región. (2004). *Antecedentes para declarar a las comunas de Temuco y Padre las Casas como zona saturada por MP10*.

CONAMA IX Región. (2006). *Concentraciones horarias de MP10 en las estaciones Las Encinas y Padre las Casas*. Temuco, Chile.

CONAMA IX Región. (2010). *Resumen Calidad del Aire Estación Las Encinas, Versión Final*. Temuco, Chile.

Crank, J. (1986). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, Inglaterra: Oxford Science Publications.

Cussler, E. L. (1984). *Diffusion: Mass Transfer in fluid systems*. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

DICTUC S.A. (29 de Abril de 2009). *Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles para el año 2005 de las comunas de Temuco y Padre las Casas*. Santiago, Chile.

Fernau, M. E., Robe, F. R., Scire, J. S., & Yamartino, R. J. (2000). *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*. Concord, Estados Unidos.

Jacob, D. J. (2007). *Lectures on Inverse Modeling*. Boston, Estados Unidos: Harvard University.

Jorquera, H. (2009). *Análisis estadístico de un modelo de dispersión*. Santiago.

Jorquera, H. (2008). *Apuntes de Contaminación Atmosférica*. Santiago, Chile.

Jorquera, H., & Castro, J. (2010). Analysis of urban pollution episodes by inverse modeling. *Atmospheric Environment* .

Levy, J.; Baxter, L.; et al. (2009). Uncertainty and Variability in Health-Related Damages from Coal-Fired Power Plants in the United States. *Risk Analysis* 29(7) , 1000-1014.

Mendelsohn, R., & Müller, N. (2006). *The Air Pollution Emission Experiments and Policy Analysis Model (APEEP)*. School of Forestry and Environmental Studies, Yale University.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. (2005). *Declaración de zona saturada por material particulado respirable MP10, como concentración de 24 horas, a las comunas de Temuco y Padre las Casas: D.S. n° 35 de 2 de marzo de 2005*. 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. (1998). *Norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10: D.S. n° 59 de 16 de marzo de 1998, modificado por el D.S. n° 45 de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República*. 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.

Müller, N., & Mendelsohn, R. (2007). Measuring the damages of air pollution in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management* , 1-14.

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

Robeson, S., & Steyn, D. (1990). Evaluation and comparison of statistical forecast models for daily maximum ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 105-120.

Ruiz Reinoso, S. E. (2010). *Validación del inventario de emisiones de CO mediante modelación inversa en la ciudad de Quito - Ecuador*. Santiago.

Schmidheiny, K. (2009). *Short Guides to Microeconometrics*. Barcelona, España.

Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*. Concord, Estados Unidos.

Servicio Salud Araucanía Sur, Subdirección Salud Ambiental. (2004). *Resolución exenta n° 2074 de 20 de agosto de 2004*. Temuco, Chile.

Southwest Clean Air Agency. (2010). *SWCAA - WA Certified Wood Stoves*. Recuperado el 2 de Agosto de 2010, de Washington-Certified: <http://www.swcleanair.org/woodstovelist.html>

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

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (23 de Octubre de 2009). *Preferred/Recommended Models | TTN - Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling | US EPA*. Recuperado el 25 de Marzo de 2010, de sitio Web de U.S. EPA: http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm

World Health Organization. (2004). *Health Aspects of Air Pollution, Results from the WHO Project: "Systematic Review of Health Aspects in Europe"*. Copenhagen, Dinamarca.

ANEXOS

ANEXO A: EMISIONES ESTACIONALES POR POLÍGONO

Emisiones (ton/año)	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
Polígono 1	347	684	852	472	2.355
Polígono 2	254	480	591	338	1.663
Polígono 3	221	223	179	219	842
Polígono 4	124	124	99	121	468
Polígono 5	35	35	28	34	131
Puntuales	46	55	70	50	221
Total	1.027	1.600	1.818	1.235	5.679

ANEXO B: CÓDIGO MATLAB[®] UTILIZADO PARA REALIZAR MODELACIÓN INVERSA

```

% Programa que usa el modelo CALPUFF para corregir inventarios de emisiones con Modelación Inversa

load Emisiones.txt; load Sigma_R.txt; load Sigma_0.txt;
load observados.txt; load background.txt; load iday.txt; load Matriz_semana.txt; load Fuente1.txt; load
Fuente2.txt;
Conc_Sim(:,1)=Fuente1(1,:); Conc_Sim(:,2)=Fuente2(1,:);
MP10reg_ver_tco=0.4651; MP10reg_ver_plc=0.5538; MP10reg_inv_tco=0.2219;
MP10reg_inv_plc=0.2140;
for i=1:365,
    if (i<60) | (i>243)
MPRegion(i,1)=MP10reg_ver_tco*observados(i,1);MPRegion(i,2)=MP10reg_ver_plc*observados(i,2);
        elseif (i>59) & (i<244)
MPRegion(i,1)=MP10reg_inv_tco*observados(i,1);MPRegion(i,2)=MP10reg_inv_plc*observados(i,2);
        end; end;
MP10obs=observados-background-MPRegion;

% Cálculos para día 1
X_opt=[];Sigma_opt=[];DOF=[];Xa=Emisiones(1,:); Sa=0.25*diag(Emisiones(1,:).^2); Y=MP10obs(1,:);
MP10sim=[]; MP10opt=[]; DeltaX=[]; DeltaY=[]; Yap=[]; Yhat=[];
for j=1:2,
    for i=1:2,
        K(i,j)=Conc_Sim(i,j)/Emisiones(1,j);
    end; end
Se=diag((Sigma_R'*Y+Sigma_0).^2); Sum_Cov=K*Sa*K'+Se; G=Sa*K'*inv(Sum_Cov); Ysim=K*Xa;
MP10sim=[MP10sim;Ysim']; Xhat=Xa+G*(Y-Ysim); Shat=inv(K'*inv(Se)*K+inv(Sa));
Est_Sig=sqrt(diag(Shat));
for k=1:2,
    if Xhat(k)<0.0,
        Xhat(k)=Est_Sig(k);
    end; end

```

```

Yopt=K*Xhat; MP10opt=[MP10opt;Yopt']; DeltaX=[DeltaX; (Xhat-Xa)']; DeltaY=[DeltaY; (K*(Xhat-
Xa))']; Yap=[Yap; (K*Xa)']; Yhat=[Yhat; (K*Xhat)']; X_opt=[X_opt; Xhat']; Sigma_opt=[Sigma_opt;
Est_Sig']; Ds=trace(eye(2)-Shat*inv(Sa)); DOF=[DOF;Ds];

```

```

% Secuencia de cálculo con el Filtro de Kalman para resto del año

```

```

for i=2:365,
ind=iday(i);
MM=diag(Matriz_semana(ind,:));Xa=MM*Xhat; a=MM*Shat*MM'+0.25*diag(Emissiones(i,:).^2);
Y=MP10obs(i,:);
Conc_Sim(:,1)=Fuente1(i,:); Conc_Sim(:,2)=Fuente2(i,:);
for j=1:2,
for k=1:2,
K(k,j)=Conc_Sim(k,j)/Emissiones(i,j);
end; end
KK=[]; YY=[]; SigmaR=[]; Sigma0=[];
for j=1:2,
if Y(j)>0
KK=[KK;K(j,:)]; YY=[YY;Y(j)]; SigmaR=[SigmaR;Sigma_R(j)]; Sigma0=[Sigma0;Sigma_0(j)];
end; end
Se=diag((SigmaR.*YY+Sigma0).^2); Sum_Cov=KK*Sa*KK'+Se; G=Sa*KK'*inv(Sum_Cov);
Xhat=Xa+G*(YY-KK*Xa); Shat=inv(KK'*inv(Se)*KK+inv(Sa)); Est_Sig=sqrt(diag(Shat));
Ysim=K*Xa; MP10sim=[MP10sim;Ysim'];
for m=1:2,
if Xhat(m)<0.0
Xhat(m)=Est_Sig(m);
end; end
Yopt=K*Xhat; MP10opt=[MP10opt;Yopt']; DeltaX=[DeltaX; (Xhat-Xa)']; DeltaY=[DeltaY; (K*(Xhat-
Xa))']; Yap=[Yap; (K*Xa)']; Yhat=[Yhat; (K*Xhat)']; X_opt=[X_opt; Xhat']; Sigma_opt=[Sigma_opt;
Est_Sig']; Ds=trace(eye(2)-Shat*inv(Sa)); DOF=[DOF;Ds];
end
MP10_fact=X_opt./Emissiones(1:365,:);
for j=1:365
for k=1:2
if MP10obs(j,k)<0.0
MP10obs(j,k)=NaN;
end; end; end;

```

ANEXO C: MONITOREO AMBIENTAL

La información de la calidad del aire monitoreada en las comunas de Temuco y Padre las Casas con la que se trabajó para el desarrollo de esta Tesis fue facilitada por la CONAMA IX Región (2006), correspondiendo ésta a valores horarios de la concentración de MP_{10} , en $\mu g/m^3$, registrados durante el año 2006 en ambas estaciones de monitoreo.

Las tecnologías de medición de MP_{10} utilizadas en ambas estaciones de monitoreo en dicho año correspondieron a: atenuación de rayos beta en Temuco y TEOM en Padre las Casas, sin embargo, las mediciones realizadas en ésta última debieron ser modificadas ya que, por medio de la Resolución exenta n° 2074 dictada por el Servicio Salud Araucanía Sur en 2004, se establece que las concentraciones de MP_{10} registradas en dicha estación deben ser corregidas por los factores determinados experimentalmente mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Factores de corrección a aplicar a las concentraciones de MP_{10} registradas en la estación de monitoreo de Padre las Casas.

Período	Factor de corrección
Abril a Julio	1,27
Agosto a Marzo	1,10

Fuente: Elaboración propia.

Dicha Resolución establece que “los datos corregidos con los factores señalados en el punto precedente, constituirán datos oficiales de material particulado MP_{10} ” para la comuna de Padre las Casas, por lo que fueron estos datos corregidos los que se utilizaron en el análisis de la calidad del aire de esta Tesis.

Para cada una de las estaciones de monitoreo se calcularon las concentraciones diarias, o de 24 horas, de los días que contaban con más del 75% de la información horaria disponible y validada, es decir, para los días que contaban con al menos 18 valores horarios válidos. De esta forma, para la estación de monitoreo de Temuco se obtuvieron 362 valores de concentraciones promedio diarias, mientras que para la estación de Padre las Casas se obtuvieron 358 valores, debiéndose los valores faltantes a la insuficiencia de valores horarios disponibles para dichos días. La evolución anual de las concentraciones diarias registradas en ambas estaciones de monitoreo se puede apreciar en la Figura 1.

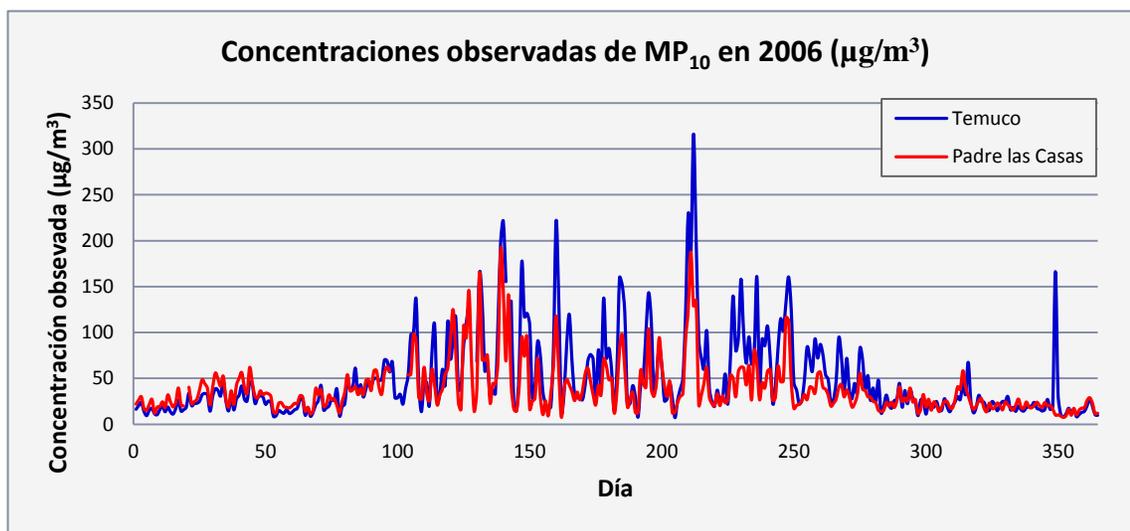


Figura 1: Concentraciones de MP₁₀ registradas en las estaciones de monitoreo de Temuco y Padre las Casas en el año 2006 (µg/m³).
Fuente: Elaboración propia.

Los valores más representativos de las concentraciones de 24 horas registradas en ambas estaciones de monitoreo durante el año 2006 se presentan en la Tabla 2. Específicamente se pueden observar la concentración media anual, la desviación estándar, la cantidad de días en los que se observaron concentraciones

superiores a los 120 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el percentil 98 de los valores diarios. En rojo se presentan los valores que se encuentran excediendo la normativa vigente y en naranja los que exceden la normativa que podría regir a partir del año 2012.

Tabla 2: Resumen con los valores más representativos de los valores diarios de concentración de MP_{10} registradas en ambas estaciones de monitoreo.

	Temuco	Padre las Casas
Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	48,8	38,5
Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44,1	27,9
Núm. días > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	29	10
Núm. días > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	16	3
Percentil 98 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	174,5	128,2

Fuente: Elaboración propia.

Se observa de esta forma que en la comuna de Temuco se sobrepasa la norma vigente como concentración de 24 horas, mientras que la norma como concentración anual está próxima a ser sobrepasada. En Padre las Casas en cambio, no se sobrepasa ninguna de las normas primarias actuales, sin embargo, si se compararan los niveles de contaminación observados con la norma que pudiera aplicarse el año 2012, esta comuna estaría sobrepasando la norma como concentración de 24 horas, pero no la anual.

Las distribuciones mensuales de las concentraciones de 24 horas observadas en ambas comunas se presentan en los *box plots* de la Figura 2 y Figura 3.

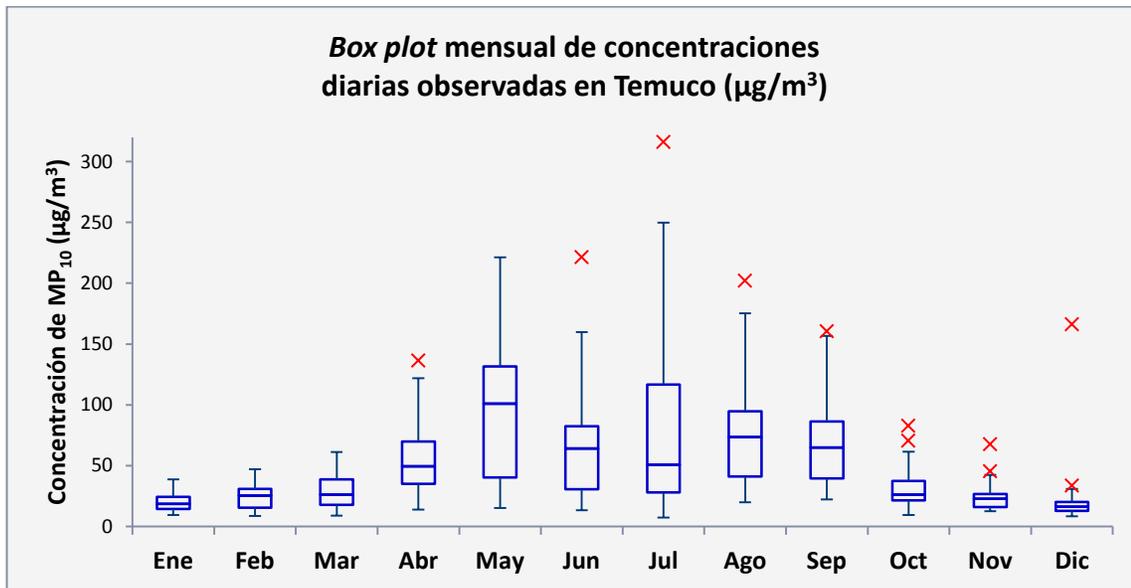


Figura 2: *Box plot* mensual de las concentraciones diarias observadas en la estación de Temuco.
Fuente: Elaboración propia.

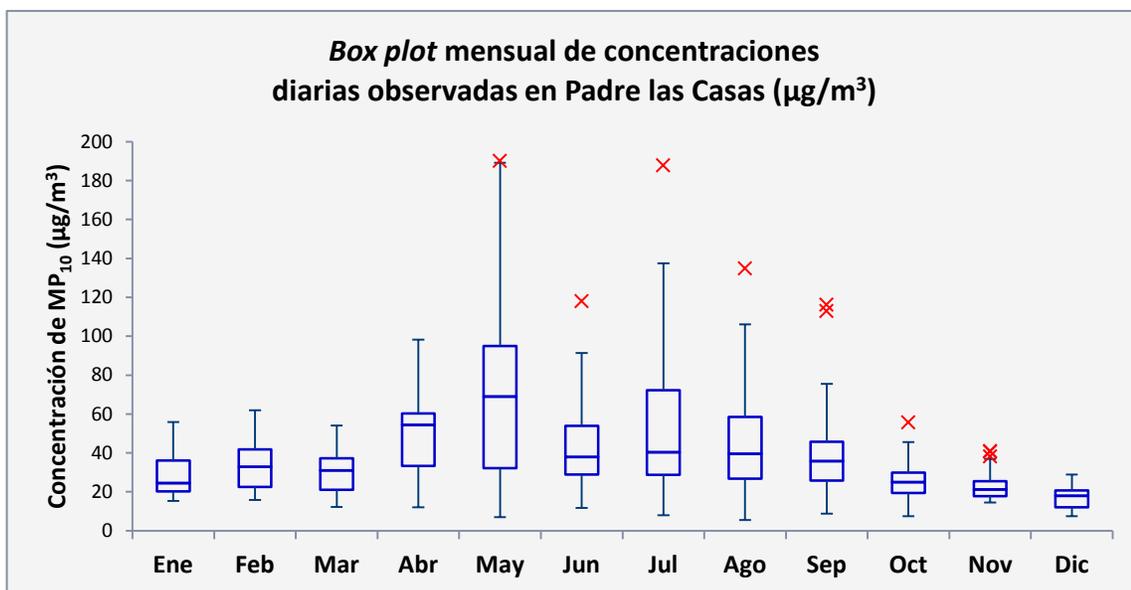


Figura 3: *Box plot* mensual de las concentraciones diarias observadas en la estación de Padre las Casas.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D: CÓDIGO MATLAB® UTILIZADO PARA REALIZAR SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

```

% Programa que usa el modelo CALPUFF para corregir inventarios de emisiones por Modelación Inversa

load Emisiones.txt; load Sigma_R.txt; load Sigma_0.txt; load observados.txt; load background.txt; load
iday.txt; load Matriz_semana.txt; load Fuente1.txt; load Fuente2.txt; parval=[]; Xgrand1=[];Xgrand2=[];
Conc_Sim(:,1)=Fuente1(1,:); Conc_Sim(:,2)=Fuente2(1,:);

% Porcentaje de las observaciones que corresponde a background regional
MP10reg_ver_tco=0.4651;MP10reg_ver_plc=0.5538;MP10reg_inv_tco=0.2219;MP10reg_inv_plc=0.214;
for i=1:365,
    if (i<60) | (i>243)
MPRegion(i,1)=MP10reg_ver_tco*observados(i,1);MPRegion(i,2)=MP10reg_ver_plc*observados(i,2);
        elseif (i>59) & (i<244)
MPRegion(i,1)=MP10reg_inv_tco*observados(i,1);MPRegion(i,2)=MP10reg_inv_plc*observados(i,2);
        end; end;
MP10obs=observados-background-MPRegion;

% Ciclo principal de iteraciones del Filtro de Kalman
for l=1:5000,
    alfa=0.2+0.2*rand(1,1); beta=0.2+0.4*rand(1,1); gamma=0.1+0.3*rand(1,1); Sigma_R=beta*ones(2);
    parval=[parval; alfa beta gamma]; K=zeros(2,2); X_opt=[]; Sigma_opt=[]; DOF=[]; Xa=Emisiones(1,:);
    Sa=alfa*diag(Emisiones(1,:).^2); Y=MP10obs(1,:);
    for j=1:2,
        for k=1:2,
            K(k,j)=Conc_Sim(k,j)/Emisiones(1,j);
        end; end
    KK=[]; YY=[]; SigmaR=[]; Sigma0=[]; DeltaX=[]; MP10sim=[]; MP10opt=[];
    for i=1:2,
        if Y(i)>0
            KK=[KK;K(i,:)]; YY=[YY;Y(i)]; SigmaR=[SigmaR;Sigma_R(i)]; Sigma0=[Sigma0;Sigma_0(i)];
        end; end
    Se=diag((SigmaR.*YY+Sigma0).^2); Sum_Cov=KK*Sa*KK'+Se; G=Sa*KK'*inv(Sum_Cov);
    Ysim=K*Xa; MP10sim=[MP10sim;Ysim']; Xhat=Xa+G*(YY-Ysim);
    Shat=inv(KK*inv(Se)*KK+inv(Sa)); Est_Sig=sqrt(diag(Shat));

```

```

for k=1:2,
    if Xhat(k)<0.0
        Xhat(k)=Est_Sig(k);
    end; end
Yopt=K*Xhat; MP10opt=[MP10opt;Yopt'];DeltaX=[DeltaX; (Xhat-Xa)']; X_opt=[X_opt; Xhat'];
Sigma_opt=[Sigma_opt; Est_Sig']; Ds=trace(eye(2)-Shat*inv(Sa)); DOF=[DOF;Ds];

%Secuencia de cálculo con el filtro de Kalman para resto del año
for i=2:365,
ind=iday(i); M=diag(Matriz_semana(ind,:)); Xa=M*Xhat; Y=MP10obs(i,:); Conc_Sim(:,1)=Fuente1(i,:);
Conc_Sim(:,2)=Fuente2(i,:); Sa=M*Shat*M'+gamma*diag(Emissiones(i,:).^2);
for j=1:2,
    for k=1:2,
        K(k,j)=Conc_Sim(k,j)/Emissiones(i,j);
    end; end
KK=[]; YY=[]; SigmaR=[]; Sigma0=[];
for j=1:2,
    if Y(j)>0
        KK=[KK;K(j,:)]; YY=[YY;Y(j)]; Sigma0=[Sigma0;Sigma_0(j)]; SigmaR=[SigmaR;Sigma_R(j)];
    end; end
Se=diag((SigmaR.*YY+Sigma0).^2); Sum_Cov=KK*Sa*KK'+Se; G=Sa*KK'*inv(Sum_Cov);
Xhat=Xa+G*(YY-KK*Xa); Shat=inv(KK'*inv(Se)*KK+inv(Sa)); Est_Sig=sqrt(diag(Shat));
Ysim=K*Xa; MP10sim=[MP10sim;Ysim'];
for k=1:2,
    if Xhat(k)<0.0
        Xhat(k)=Est_Sig(k);
    end; end
Yopt=K*Xhat; MP10opt=[MP10opt;Yopt']; DeltaX=[DeltaX; (Xhat-Xa)']; X_opt=[X_opt; Xhat'];
Sigma_opt=[Sigma_opt; Est_Sig']; Ds=trace(eye(2)-Shat*inv(Sa)); DOF=[DOF;Ds];
end
Xgrand1=[Xgrand1 X_opt(:,1)]; Xgrand2=[Xgrand2 X_opt(:,2)];
end;
Xstd=[std(Xgrand1,0,2) std(Xgrand2,0,2)]; Xmean=[mean(Xgrand1,2) mean(Xgrand2,2)];
PM10sim_medio=[];KXmean=[];KXstd=[];Desvest=[];

```

**ANEXO E: CONCENTRACIONES DIARIAS DE MP₁₀ OBTENIDAS DE LA
SIMULACIÓN EN CALPUFF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)**

Temuco:

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	23	30	78	81	123	145	29	174	94	47	28	21
2	25	29	51	103	142	179	145	57	85	97	20	25
3	25	38	49	91	88	97	312	78	64	64	49	22
4	43	18	58	85	42	100	220	116	140	29	30	19
5	12	31	68	110	101	41	95	180	137	51	13	15
6	32	24	58	84	156	23	23	29	71	40	27	16
7	38	18	61	114	179	16	21	25	114	50	18	20
8	23	21	36	93	136	126	45	21	64	56	21	22
9	10	30	68	90	95	317	35	50	15	82	28	24
10	39	26	103	82	95	146	11	13	28	40	54	19
11	38	10	95	49	177	29	46	15	63	35	27	31
12	32	12	127	45	205	41	33	70	67	75	47	37
13	12	29	42	78	136	160	117	19	58	23	63	36
14	21	22	84	116	55	133	124	66	50	13	17	41
15	14	34	112	89	45	162	99	124	58	33	21	28
16	28	48	64	146	29	94	112	144	42	35	52	8
17	23	31	80	156	25	32	51	127	52	61	33	30
18	18	43	89	38	118	31	129	134	38	42	36	15
19	16	37	65	9	166	20	138	176	66	58	22	27
20	32	35	90	129	260	32	35	90	50	37	25	27
21	38	46	54	81	218	173	18	96	22	49	55	11
22	32	16	117	41	121	117	62	110	44	70	26	14
23	15	20	65	145	55	65	39	178	69	34	29	16
24	19	17	118	135	34	79	20	138	126	13	30	23
25	18	16	80	45	13	80	58	103	77	41	24	37
26	26	18	64	173	158	156	135	84	32	36	20	14
27	29	46	73	150	244	170	134	102	58	13	14	29
28	36	40	33	51	161	151	227	78	46	39	21	47
29	14		75	68	202	123	186	46	47	36	19	46
30	15		135	98	105	122	237	11	70	25	16	11
31	32		66		27		273	74		43		20

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
N Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mínimo	10	10	33	9	13	16	11	11	15	13	13	8	8
Máximo	43	48	135	173	260	317	312	180	140	97	63	47	317
Promedio	25	28	76	92	120	105	103	88	65	44	29	24	67
Desviación estándar	9	11	26	40	68	67	83	53	31	20	14	10	55
Días > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	2	7	16	14	12	9	3	0	0	0	63
Días > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0	3	11	8	6	4	0	0	0	0	32
												Perc 98	219

Padre las Casas:

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	8	10	15	32	50	27	5	57	36	16	9	3
2	8	9	13	30	48	39	17	13	32	28	9	7
3	7	9	8	33	24	31	89	21	23	24	21	10
4	13	2	21	18	4	12	66	32	65	21	12	7
5	5	6	23	32	31	20	32	87	44	19	8	3
6	9	7	11	43	55	9	14	27	24	14	8	6
7	15	4	27	19	67	21	24	18	29	12	3	5
8	7	7	10	22	39	33	25	15	22	25	11	6
9	5	12	20	32	6	82	8	31	10	18	12	7
10	9	11	41	35	12	46	11	14	19	8	16	4
11	10	4	29	6	53	4	26	19	28	11	8	4
12	11	2	36	3	54	25	24	16	21	17	7	7
13	6	10	7	21	27	21	22	15	26	12	16	8
14	6	4	20	20	8	34	44	36	19	13	10	9
15	6	7	33	40	7	48	15	44	13	11	6	13
16	6	6	21	56	26	34	37	35	23	15	19	6
17	8	9	22	60	16	18	22	29	32	26	16	7
18	3	10	23	14	32	14	31	39	23	9	11	7
19	3	16	16	8	60	21	43	37	17	18	12	7
20	10	13	30	32	86	31	36	33	25	11	3	8
21	15	19	23	28	66	49	18	38	14	12	12	7
22	6	7	32	12	46	13	28	40	9	20	7	7
23	3	2	30	54	10	24	6	78	17	12	10	4

24	5	4	19	33	5	12	5	50	35	5	7	3
25	9	5	31	9	8	41	12	33	36	11	13	10
26	11	8	19	29	30	35	33	36	12	10	10	8
27	10	11	27	52	70	59	21	33	26	11	3	8
28	9	10	10	16	78	31	53	40	21	15	6	8
29	3		24	30	51	45	64	29	11	11	5	11
30	6		35	50	27	50	53	12	13	8	5	1
31	9		27		8		70	16		13		4

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
N Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mínimo	3	2	7	3	4	4	5	12	9	5	3	1	1
Máximo	15	19	41	60	86	82	89	87	65	28	21	13	89
Promedio	8	8	23	29	36	31	31	33	24	15	10	7	21
Desviación estándar	3	4	9	15	24	17	21	18	12	6	4	3	17
Días > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Días > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
												Perc 98	69

**ANEXO F: EMISIONES DIARIAS CORREGIDAS OBTENIDAS DE LA
MODELACIÓN INVERSA (ton/día)**

Temuco:

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1.7	2.1	0.7	3.0	4.1	1.8	3.6	6.5	2.1	1.7	1.6	2.2
2	2.1	1.9	1.6	0.4	3.6	2.7	3.1	9.8	2.8	2.3	2.5	0.1
3	2.4	1.9	2.2	0.3	1.0	4.5	2.3	7.1	4.0	3.0	1.3	0.9
4	0.6	3.5	1.7	1.6	5.7	2.4	4.6	3.6	2.5	3.9	1.9	2.3
5	1.8	0.3	0.9	2.2	5.4	3.8	6.8	3.0	3.1	3.4	3.5	3.5
6	0.6	2.0	0.3	3.0	3.2	5.4	7.2	7.1	4.6	1.4	2.0	3.2
7	0.5	2.1	1.4	1.9	3.4	8.1	7.7	7.6	1.1	1.7	4.4	3.1
8	0.4	2.8	1.2	1.1	4.3	5.7	7.3	7.3	1.8	0.8	5.2	1.6
9	2.3	1.3	0.6	0.5	5.3	4.5	6.4	5.6	4.3	1.5	3.5	0.9
10	0.3	2.2	1.0	2.1	3.2	5.2	4.8	10.4	3.3	0.5	1.1	1.9
11	0.5	5.4	0.0	3.9	4.3	3.2	6.6	13.5	2.5	1.4	3.0	1.4
12	0.3	5.7	0.5	3.2	1.7	5.2	9.7	6.4	3.7	1.2	3.6	1.2
13	3.4	3.5	2.2	2.2	1.8	2.9	6.3	8.1	4.2	2.4	0.9	0.2
14	1.3	5.1	0.7	1.3	4.7	4.3	6.9	8.4	4.3	4.2	2.1	0.7
15	1.8	0.5	0.8	3.6	3.1	2.8	6.3	8.2	5.4	2.4	2.8	2.4
16	1.3	0.7	1.7	2.3	5.4	0.9	2.3	3.6	5.8	2.8	1.3	5.1
17	2.4	1.4	0.3	2.2	7.7	5.2	6.1	5.1	5.2	1.7	1.7	0.8
18	2.2	1.0	1.1	4.4	5.1	6.7	4.8	8.8	6.1	1.5	1.5	1.3
19	2.9	0.1	0.4	7.6	7.1	8.7	1.4	4.2	2.6	1.0	2.1	1.1
20	0.2	0.5	0.3	0.5	4.3	10.0	4.1	5.0	2.3	0.9	2.1	0.9
21	0.1	0.4	2.2	1.5	2.6	2.2	7.8	6.3	3.5	1.6	0.5	2.3
22	0.8	1.0	0.6	3.0	3.3	3.8	5.6	3.9	1.8	0.2	2.5	2.7
23	3.5	0.8	1.4	2.3	9.0	6.0	5.0	2.5	1.5	0.5	1.0	1.2
24	3.2	2.1	0.2	3.3	3.2	1.9	2.8	6.4	2.1	2.3	1.4	1.1
25	3.3	2.1	2.6	2.1	5.2	5.6	1.5	2.4	2.6	1.3	2.1	0.4
26	2.7	1.5	1.1	0.8	1.0	1.3	1.4	6.5	3.9	1.9	4.0	2.0
27	2.3	0.6	2.2	1.7	2.8	4.0	0.8	6.2	3.8	2.0	6.8	1.6
28	1.6	0.4	5.7	5.2	2.9	0.1	2.1	8.5	2.7	1.1	3.0	1.1
29	2.6		2.1	9.3	2.8	3.1	6.9	10.4	1.9	1.2	3.4	0.5
30	4.7		1.5	4.2	3.3	1.9	5.2	12.6	1.7	1.9	3.3	2.2
31	3.1		2.3		5.8		7.1	4.8		1.1		1.3

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	1.8	1.9	1.3	2.7	4.1	4.1	5.0	6.8	3.2	1.8	2.5	1.6	3.1
Desviación estándar	1.2	1.5	1.1	2.0	1.8	2.3	2.3	2.8	1.3	1.0	1.4	1.1	2.3

Padre las Casas:

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	3.0	15.7	5.9	17.2	13.1	7.2	11.4	15.9	8.6	4.7	3.8	11.8
2	4.2	15.4	7.4	15.6	12.3	10.1	10.7	11.3	6.8	5.8	4.3	9.3
3	4.8	18.0	8.9	17.7	11.6	6.7	12.6	10.3	5.6	3.7	3.6	5.0
4	3.8	17.6	10.6	17.5	10.5	4.8	12.8	12.4	5.7	3.7	4.4	6.7
5	4.2	14.8	10.4	19.7	13.9	6.7	14.8	6.1	5.8	3.4	4.4	6.7
6	5.5	18.8	14.8	18.5	14.0	5.7	9.9	5.7	5.2	4.8	5.4	7.4
7	4.6	18.1	7.6	22.0	13.1	7.5	8.2	6.8	1.8	5.4	5.2	7.6
8	3.7	19.8	8.6	21.6	16.5	8.8	8.3	7.0	1.5	3.8	6.5	8.3
9	5.1	16.9	9.3	17.9	16.2	11.0	7.7	6.9	2.5	1.9	7.3	8.6
10	4.5	19.0	10.0	19.9	19.2	10.1	7.9	7.1	2.3	3.0	8.7	7.7
11	5.4	18.4	10.4	17.5	19.7	9.4	9.1	8.0	2.7	2.8	9.6	9.9
12	4.6	15.4	9.3	18.4	15.0	10.7	10.5	8.4	2.2	3.6	9.0	9.1
13	5.4	18.9	12.6	17.0	16.1	11.8	11.1	8.3	2.5	3.7	5.4	10.1
14	6.3	17.7	12.5	21.2	14.9	9.8	13.8	10.2	3.4	3.7	4.5	6.8
15	6.0	18.7	13.4	18.7	17.9	9.8	14.6	8.7	4.5	3.4	5.8	2.3
16	7.8	17.9	12.7	16.4	12.5	6.8	7.0	5.8	4.6	4.7	4.0	1.4
17	8.3	16.2	13.2	16.7	14.0	8.6	10.3	7.6	3.3	4.3	4.7	1.9
18	9.6	13.7	12.1	14.2	13.5	8.8	11.3	9.1	2.8	5.6	4.9	1.6
19	9.9	9.4	8.4	15.8	16.1	11.4	12.0	11.4	4.2	5.1	3.4	2.1
20	10.1	10.5	10.6	16.5	14.5	11.0	10.6	10.7	3.4	6.4	4.9	3.0
21	8.2	5.2	11.1	12.2	7.8	10.8	11.5	14.0	2.6	7.4	5.2	2.3
22	7.6	4.9	12.9	13.2	11.3	12.3	11.3	6.4	4.1	4.9	6.3	3.3
23	9.3	4.7	12.5	11.5	12.3	13.0	10.4	8.5	4.5	6.1	7.0	4.0
24	9.4	5.7	15.8	12.2	14.5	11.6	13.8	8.8	3.3	6.0	8.6	3.8
25	10.6	6.6	15.6	12.7	12.2	8.1	13.2	9.2	2.7	4.8	4.9	4.7
26	10.8	5.9	14.1	14.9	13.7	11.0	7.8	9.8	3.4	5.7	4.5	4.5
27	12.9	4.8	17.3	7.8	13.2	11.0	8.5	8.8	3.0	4.9	5.6	5.6
28	13.7	4.5	16.4	9.5	8.7	12.9	11.3	10.9	3.0	4.5	6.6	6.2
29	11.5		15.3	10.0	11.9	10.5	12.4	11.2	4.3	3.0	8.0	7.7

30	14.8		14.5	9.2	5.8	10.1	12.3	12.4	4.8	4.8	9.0	7.7
31	14.5		16.3		8.4		15.8	14.6		4.2		7.1

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
Promedio	7.7	13.3	11.9	15.8	13.4	9.6	11.1	9.4	3.8	4.5	5.8	5.9	9.3
Desviación estándar	3.4	5.7	3.0	3.8	3.1	2.1	2.3	2.6	1.6	1.2	1.8	2.9	4.7

ANEXO G: CONCENTRACIONES OBTENIDAS EN TEMUCO Y PADRE LAS CASAS PARA LOS CASOS CALCULADOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES CORREGIDAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

- i) Concentraciones obtenidas reduciendo las emisiones corregidas del polígono correspondiente a Temuco:

Norma	Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Saturación		Latencia	
		Temuco	Padre las Casas	Temuco	Padre las Casas
Diaria	Percentil 98	149	99	119	91
	Media anual	43	33	34	32
Anual	Percentil 98	172	104	137	96
	Media anual	49	35	39	33

- ii) Concentraciones obtenidas reduciendo las emisiones corregidas de los polígonos correspondientes a Temuco y Padre las Casas:

Norma	Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Saturación		Latencia	
		Temuco	Padre las Casas	Temuco	Padre las Casas
Diaria	Percentil 98	149	90	119	72
	Media anual	43	31	34	25
Anual	Percentil 98	172	104	135	83
	Media anual	49	35	39	29