

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**MONITOREO PASIVO Y ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL
DE CHILE PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO DE
DISPERSIÓN FOTOQUÍMICO MATCH**

CLAUDIO ALBERTO AGUILERA MARABOLÍ

Profesor Guía: Dr. Pedro Pablo Oyola Tapia
Tesis Para Optar Al Título Profesional De Ingeniero Físico

Santiago, Chile
2015

**MONITOREO PASIVO Y ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL
DE CHILE PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO DE
DISPERSIÓN FOTOQUÍMICO MATCH**

CLAUDIO ALBERTO AGUILERA MARABOLÍ

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Pedro Oyola Tapia, Director del Centro Premio Nobel Mario Molina Chile, y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora:

Dr. Ernesto Gramsch Labra _____

Dr. Patricio Pérez Jara _____

Dr. Daniel Osvaldo Serafini _____

Dra. María Angélica Rubio Campos _____

Dr. Pedro Oyola Tapia
Profesor Guía

Dra. Yolanda Vargas Hernández
Directora del Departamento de Física

© Claudio Alberto Aguilera Marabolí

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica.

DEDICATORIA

A mi madre Natalia y a mi hermana Natalie...

*“Hay hombres que luchan un día y son buenos. Hay otros que luchan un año y son mejores. Hay quienes luchan muchos años, y son muy bueno. Pero hay los que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles”,
Bertolt Brecht.*

AGRADECIMIENTOS

- A Don Pedro Oyola, Director General del Centro Premio Nobel Mario Molina Chile (CMMCh), por la guía, sus consejos y la tremenda oportunidad de realizar mi Trabajo de Titulación en el Centro.
- Al equipo del CMMCh, Felipe Reyes, Rodrigo Donoso, Sergio Soler, Yeanice Vásquez, Marcela Castillo, Cristina Valverde, Juan Pablo Moraga, Matías Tagle, Marcelo Fernández, Don Ernesto Gramsch, Don Gianni López, Thanya Larach y Ximena Díaz, por el apoyo y buena onda.
- A Don Lars Gidhagen, Jefe de Investigación del Instituto Sueco de Hidrología y Meteorología, por facilitarme los resultados de la modelación del WRF-MATCH y por aclarar todas mis dudas sobre el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.
- A Don Marcelo Corral, Jefe del Departamento de Redes de Monitoreo del Ministerio de Medio Ambiente, por facilitarme los datos meteorológicos históricos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire para la Región Metropolitana de Santiago, y por contactarme con Doña Isabel Ramos, Funcionaria de la Oficina de Modelos y Desarrollo de la Dirección Meteorológica de Chile.
- A Doña Isabel Ramos, por facilitarme información sobre los dominios de modelación del “Weather Research and Forecasting Model”.
- A Don Martin Ferm, Investigador Senior del Instituto Sueco de Investigación Ambiental, por facilitarme información acerca de los muestreadores pasivos.
- A Jorge Tello, por ayudarme en el desarrollo del proyecto final de Laboratorio IV (Termodinámica) y de Laboratorio Avanzado.
- A mis amigos del alma, Manuel Navarrete, Eduardo Jara, Claudia Jofré, José Díaz, Manuel Sepúlveda, Fernando Rodríguez, Nicolás Cabezas y Cristian Barrera, por las jornadas de estudio y los innumerables momentos de distensión y reflexión que vivimos durante nuestra estadía en mi querida USACH.
- A mi tío Nibaldo Rubio, que más que un tío es un padre para mí, por sus consejos de vida y apoyo incondicional.
- A mi madre Natalia Marabolí y a mi hermana Natalie Aguilera, por apoyarme y alentarme incondicionalmente durante esta hermosa etapa de mi vida. Sin ustedes, esto no habría sido posible. Las amo infinitamente.

“El agradecimiento es la memoria del corazón”, Lao-Tsé.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 FUNDAMENTACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 METODOLOGÍA.....	5
2. MACROZONA CENTRAL DE CHILE	7
2.1 TOPOGRAFÍA Y CLIMA.....	8
2.2 PRINCIPALES FUENTES EMISORAS	11
3. MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS .	14
3.1 TIPO DE MODELOS	15
3.2 COMPONENTES DE UN MODELO.....	21
4. MODELO DE DISPERSIÓN FOTOQUÍMICO MATCH	22
4.1 ESTRUCTURA MATCH	22
4.2 TIME-SPLITTING	24
4.3 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS COMO VARIABLE DE ENTRADA DEL MATCH.....	26
4.4 INVENTARIO DE EMISIONES COMO VARIABLE DE ENTRADA DEL MATCH.....	28
5. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CRITERIO.....	37

5.1 OZONO	38
5.2 DIÓXIDO DE AZUFRE	40
5.3 DIÓXIDO DE NITRÓGENO.....	40
5.4 MATERIAL PARTICULADO 2,5	41
5.5 AMONÍACO.....	43
5.6 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.....	43
5.7 NORMAS PRIMARIAS DE CALIDAD DEL AIRE VIGENTES EN CHILE	44
6. TUBOS PASIVOS	47
6.1 TUBOS PASIVOS DE OZONO, DIÓXIDO DE AZUFRE, DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y AMONÍACO.....	47
6.2 TUBOS PASIVOS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.....	55
7. RED DE MONITOREO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE	61
7.1 MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE ..	61
7.2 MONITOREO PASIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE ..	65
8. RESULTADOS MONITOREO PASIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE	73
8.1 DIÓXIDO DE AZUFRE	73
8.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO.....	75
8.3 AMONÍACO.....	75
8.4 OZONO	77
8.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.....	79
9. RESULTADOS MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE	81
9.1 USACH.....	82
9.2 LAS CONDES	86
9.3 MELIPILLA	89
10. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN WRF-MATCH.....	92
10.1 DIÓXIDO DE AZUFRE	92

10.2	DIÓXIDO DE NITRÓGENO.....	92
10.3	AMONÍACO.....	93
10.4	OZONO	93
10.5	MATERIAL PARTICULADO 2,5 PRIMARIO	94
11.	COMPARACIÓN DE LOS DATOS MONITOREADOS Y LOS MODELADOS.....	95
11.1	DIÓXIDO DE AZUFRE	99
11.3	AMONÍACO.....	104
11.4	OZONO	109
11.5	MATERIAL PARTICULADO 2,5 PRIMARIO	112
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
	BIBLIOGRAFÍA.....	119
	REFERENCIAS	120
	GLOSARIO	122
	ANEXO	124
13.	ANÁLISIS RESULTADOS MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE.....	124
13.1	USACH.....	124
13.2	LAS CONDES	127
13.3	MELIPILLA	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen del inventario de emisiones de la RM. Fuente: Estudio “Actualización y Sistematización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana”, elaborado por el Departamento de Física de la USACH en Abril de 2014.	11
Tabla 2.2: Resumen del inventario de emisiones de la V región. Fuente: Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica Región de Valparaíso. Construcción de un Inventario de Emisiones Regional, elaborado por Ambiosis, Universidad de Playa Ancha, SMHI, Apertum IT AB y Geadur en Diciembre de 2011.	12
Tabla 2.3: Resumen inventario de emisiones de la VI Región. Fuente: Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Calidad del Aire VI Región, elaborado por Ingeniería DICTUC en Enero de 2008.	13
Tabla 4.1: Características generales del dominio de modelación utilizado por el MATCH. Fuente: Elaboración propia.	26
Tabla 4.2: Principales características del <i>Dominio 2</i> del modelo WRF utilizado para las simulaciones de los parámetros meteorológicos como variable de entrada del modelo de dispersión fotoquímico MATCH. Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 4.3: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora, productos esperados y aplicaciones para el inventario de emisiones de la V Región. Fuente: Inventario de emisiones V región.	29
Tabla 4.4: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora para el inventario de emisiones de la RM. Fuente: Inventario de emisiones RM.	30
Tabla 4.5: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora, productos esperados y aplicaciones para el inventario de emisiones de la VI Región. Fuente: Inventario de emisiones VI región.	35
Tabla 5.1: Tabla resumen de la norma primaria de calidad del aire vigente en Chile para cada contaminante atmosférico criterio. Fuente: Elaboración propia.	45
Tabla 5.2: Tabla resumen de los efectos sobre la salud de los distintos contaminantes atmosféricos criterio. Fuente: CMMCh.	46
Tabla 6.1: Límites de detección para un tiempo de exposición de 1 mes prescritos en los protocolos de trabajo del IVL para cada contaminante atmosférico. Fuente: IVL.	49
Tabla 6.2: Los rangos de detección para cada contaminante atmosférico de los tubos pasivos de COV's impregnados con TENAX para un tiempo de exposición de 7 días. Fuente: IVL.	58

Tabla 7.1: Cantidad y tipo de tubo pasivo instalado por cuadrante de la grilla espacial diseñada sobre la MZC. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 7.2: Fecha de monitoreo y tiempo de exposición de cada tipo de tubo pasivo instalado en cada sitio de la figura n° 7.6. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 7.3: Promedio mensual de concentración de 24 horas de O ₃ , NO ₂ y SO ₂ durante los meses de junio, julio y agosto del año 2014. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 7.4: Tiempo de exposición de los tubos pasivos de O ₃ , NO ₂ y SO ₂ durante los meses de junio, julio y agosto del año 2014. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 7.5: Altura y coordenadas geográficas de los 4 sitios en donde se monitoreó con muestreadores pasivos para la generación de un gradiente vertical de precursores de MP _{2,5} . Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 8.1: Concentración de SO ₂ [µg/m ³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 8.2: Concentración de NO ₂ [µg/m ³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 8.3: Concentración de NH ₃ [µg/m ³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 8.4: Concentración de O ₃ [µg/m ³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 8.5: Concentración de COV's [µg/m ³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 9.1: Tabla resumen del monitoreo activo en la MZC. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 10.1: Concentración de SO ₂ [µg/m ³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 10.2: Concentración de NO ₂ [µg/m ³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 10.3: Concentración de NH ₃ [µg/m ³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 10.4: Concentración de O ₃ [µg/m ³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 10.5: Concentración de MP _{2,5} Primario [µg/m ³] modelado para cada uno de los sitios de la MZC en donde se monitoreó de forma continua. Fuente: Elaboración propia.	94

Tabla 11.1: Ente desarrollador, año de realización y número de páginas de los inventarios de emisión correspondientes a las regiones que comprenden la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 11.2: Promedios mensuales de la Humedad Relativa, de la Presión Media, de la Dirección e Intensidad del Viento entre los meses de mayo y agosto de los años 2012 y 2015 en las estaciones meteorológicas de la DMC ubicadas en las regiones que abarcan la MZC. Fuente: Elaboración propia con datos de la DMC.....	96
Tabla 11.3: Dióxido de Azufre monitoreado, Dióxido de Azufre modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	100
Tabla 11.4: Dióxido de Nitrógeno monitoreado, Dióxido de Nitrógeno modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	104
Tabla 11.5: Amoníaco monitoreado, Amoníaco modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 11.6: MP _{2,5} Primario monitoreado, MP _{2,5} Primario modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	113
Tabla 11.7: Tabla resumen de la comparación entre la concentración modelada y la monitoreada para distintos contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagen de una simulación del WRF-MATCH del $MP_{2,5}$ total en la MZC, durante el 09/03/12 y el 21/08/12, correspondiente al proyecto “Aporte Interregional a las Concentraciones de $MP_{2,5}$ en la RM”. Fuente: CMMCh.....	2
Figura 2.1: Imagen satelital de la MZC. En color blanco, el nombre de las ciudades más pobladas de la MZC (de norte a sur: Valparaíso, Santiago y Rancagua). Fuente: Google Earth.	7
Figura 2.2: Fotografía de la cuenca de Rancagua desde el <i>Camino del Cobre</i> ($34^{\circ}11'45''$ S, $70^{\circ}34'47''$ O), en dirección al pueblo de Coya, el día miércoles 13/05/15, a las 13:20 hrs. Se puede observar cómo la cuenca de Rancagua se encuentra encajonada entre la Cordillera de la costa (al fondo de la fotografía) y la Cordillera de Los Andes (al frente de la fotografía), situación totalmente desfavorable para la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos en una de las zonas más pobladas de la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 2.3: Fotografía de la cuenca de Santiago desde el Cerro San Cristóbal ($33^{\circ}25'32''$ S, $70^{\circ}38'0''$ O) el día martes 30/06/15, a las 13:40 hrs. Dado que la cuenca de Santiago se encuentra encajonada por el Cordón de Chacabuco (al fondo de la fotografía) por el norte, la Cordillera de los Andes por el oriente, la Angostura de Paine por el sur y la Cordillera de la Costa, la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos en la zona con el principal núcleo urbano del país es sumamente desfavorable. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 3.1: Esquema de las etapas de selección, implementación, ejecución y evaluación de un modelo de dispersión atmosférica. Fuente: Gallardo, 2006.....	20
Figura 4.1: Escalonamiento de las variables en la horizontal (izquierda) y en la vertical (derecha), donde u , v , w son las componentes del viento, T la temperatura, q es la componente de la razón de mezcla modelada, qw razón de mezcla del vapor de agua y Kz el coeficiente de intercambio.	23
Figura 4.2: Esquema de los distintos <i>time-step</i> implicados en el flujo de datos del modelo de dispersión fotoquímico MATCH. Fuente: SMHI.	25
Figura 4.3: Torre DASA, comuna de Pudahuel. A lo largo de esta torre fue donde se monitoreó el “difftem”. Fuente: DMC.	27
Figura 5.1: Variabilidad espacial y temporal de los constituyentes atmosféricos. Fuente: Brasseur <i>at al.</i> , 1999.....	37
Figura 5.2: Distribución vertical típica de Ozono en la atmósfera. Fuente: http://www.aemet.es/es/noticias/2004/20040916	39

Figura 5.3: Fuentes primarias y secundarias de material particulado. Fuente: USACH.	42
Figura 6.1: A la izquierda, una fotografía de los tubos pasivos de O ₃ , SO ₂ , NO ₂ y NH ₃ respectivamente. A la derecha, una fotografía de los <i>muestreadores sensibles</i> de O ₃ , SO ₂ , NO ₂ y NH ₃ respectivamente. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 6.2: Partes y dimensiones de un <i>muestreador sensible</i> . Fuente: IVL.	47
Figura 6.3: Esquema representativo de la primera ley de Fick. Fuente: http://www.sc.ehu.es/	48
Figura 6.4: Fotografía de la hoja de protocolo de los tubos pasivos. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 6.5: Fotografía de cómo son recibidos los tubos pasivos del IVL. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 6.6: Fotografía de 4 tubos pasivos de O ₃ , SO ₂ , NO ₂ y NH ₃ colocados al interior de un recipiente. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 6.7: Fotografía de 1 tubo pasivo de O ₃ colocado al interior de un vaso plástico desechable. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 6.8: Fotografía de la perspectiva de 4 tubos pasivos (encerrados en un círculo de color amarillo) colocados al interior de un recipiente, instalados a 3 [m] de altura aproximadamente en un poste de luz en el pueblo de Coya, VI región. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 6.9: Fotografía de la perspectiva de 1 tubo pasivo de O ₃ (encerrado en un círculo de color amarillo) colocado al interior de un vaso plástico desechable, instalado a 3 [m] de altura en un árbol en el pueblo de Melipilla, RM. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 6.10: Tubo pasivo de COV's dispuesto para muestrear. Fuente: IVL.	55
Figura 6.11: Fotografía de un tubo pasivo de COV's tal cual es recibido del IVL. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 6.12: Fotografía de un tubo pasivo de COV's desenvuelto. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 6.13: Esquema del proceso de armado de un tubo pasivo de COV's. Fuente: IVL.....	57
Figura 6.14: Fotografía de 1 tubo pasivo de COV's colocado al interior de un vaso plástico desechable. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 6.15: Fotografía de la perspectiva de 1 tubo pasivo de COV's (encerrado en un círculo de color amarillo) colocado al interior de un vaso plástico desechable, instalado	

a 3 [m] de altura en un poste de luz en el pueblo de Coya, VI región. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 7.1: Imagen satelital de los 3 sitios en donde se monitoreó de forma continua en la MZC. Fuente: Google Earth.	61
Figura 7.2: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles. Fuente: Aerodyne Research Inc.	62
Figura 7.3: Esquema del funcionamiento del Monitor de Especiación Química de Aerosoles. Fuente: CMMCh.....	63
Figura 7.4: Grilla espacial diseñada sobre la MZC para la distribución del monitoreo pasivo. Fuente: Programa QGIS.....	65
Figura 7.5: Gradientes espaciales sobre las cuencas geográficas en dirección de la ciudad de Santiago. Fuente: SMHI.	66
Figura 7.6: Mapa de los sitios en donde se instaló los tubos pasivos en la MZC. Fuente: Google Earth.	68
Figura 7.7: Estaciones seleccionadas del SINCA para determinar el tiempo de exposición de los tubos pasivos instalados en la MZC. Fuente: Google Earth.....	70
Figura 7.8: Sitios en donde se monitoreó con muestreadores pasivos para la generación de un gradiente vertical de precursores de MP _{2,5} . Fuente: Google Earth...	72
Figura 8.1: Distribución espacial del sitio <i>Puchuncaví</i> con respecto a la Central Termoeléctrica AES Gener y al Terminal Marítimo ENAP, principales emisores de SO ₂ de la V región. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 8.2: Distribución espacial del sitio <i>Melipilla I</i> con respecto a la Industria de Cales y Carbonatos Soprocál S.A. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 8.3: Distribución regional de las concentraciones de O ₃ en [µg/m ³]. Fuente: CMMCh	78
Figura 8.4: Distribución regional de las concentraciones de COV's en [µg/m ³]. Fuente: CMMCh.	80
Figura 9.1: Fotografía de la estación móvil de monitoreo de calidad del aire ubicada al costado derecho del galpón del Departamento de Mecánica de la USACH. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 9.2: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> al interior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.....	83

Figura 9.3: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> al interior de la estación móvil de monitoreo desde otra perspectiva. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 9.4: Fotografía del Etalómetro SIMCA al interior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 9.5: Fotografía del <i>inlet</i> del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> (izquierda) y del Etalómetro SIMCA (derecha), ambos instalados en la parte superior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 9.6: Fotografía de la unidad motora de contaminantes atmosféricos ubicada al costado izquierdo de la estación de monitoreo Las Condes perteneciente a la red SINCA. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 9.7: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> al interior de la unidad motora de contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 9.8: Fotografía del Etalómetro SIMCA al interior de la unidad motora de contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 9.9: Fotografía de una de las casas principales de la parcela de Don Alejandro Oyola. A la izquierda (señalada con una flecha de color amarillo) la bodega en donde se instalaron los equipos de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 9.10: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> al interior de la bodega de una de las casas principales. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 9.11: Fotografía del <i>inlet</i> del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca <i>Aerodyne Research Inc.</i> (arriba) y del Etalómetro SIMCA (abajo), ambos instalados en la parte posterior de la bodega. Fuente: Elaboración propia.	90
Figura 11.1: Comparación entre Dióxido de Azufre monitoreado y Dióxido de Azufre modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC (izquierda: sitio <i>Puchuncaví</i> ; derecha: sitios <i>Tiltil</i> , <i>Coya</i> , <i>Paine</i> y <i>Melipilla I</i>). Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 11.2: Fotografía desde el sitio <i>Puchuncaví</i> . En el fondo, el complejo industrial Ventanas, ubicado a 2,6 [km] del sitio <i>Puchuncaví</i> . Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 11.3: Comparación entre Dióxido de Nitrógeno monitoreado y Dióxido de Nitrógeno modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 11.4: Comparación entre Amoníaco monitoreado y Amoníaco modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	104

Figura 11.5: Comparación entre Ozono troposférico monitoreado y Ozono troposférico modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 11.6: Comparación entre O ₃ monitoreado y O ₃ modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.....	111
Figura 11.7: Comparación entre MP _{2,5} Primario monitoreado y MP _{2,5} Primario modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 11.8: Desglose ponderado del MP _{2,5} en diferentes tipos de material particulado para cada categoría de emisión (EC: Carbono Elemental, OM: Material Orgánico, Other: Otros Constituyentes). Fuente: SMHI.....	113
Figura 13.1: Composición química del MP _{2,5} en el sitio <i>USACH</i> , durante el día martes 19/05/15 y el día martes 02/06/15. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 13.2: Perfil promedio diurno componentes primarios MP _{2,5} en el sitio <i>USACH</i> , durante el día miércoles 29/10/14 y el día jueves 13/11/14. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 13.3: Composición química del MP _{2,5} en el sitio <i>Las Condes</i> , durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15. Fuente: Elaboración propia.	127
Figura 13.4: Perfil promedio diurno componentes primarios MP _{2,5} en el sitio <i>Las Condes</i> , durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 13.5: Composición química del MP _{2,5} en el sitio <i>Melipilla</i> , durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15. Fuente: Elaboración propia.....	130
Figura 13.6: Perfil promedio diurno componentes primarios MP _{2,5} en el sitio <i>Melipilla</i> durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15. Fuente: Elaboración propia.	131

RESUMEN

Se monitoreó con equipos de muestreo continuo y con muestreadores pasivos durante los meses de mayo y agosto del año 2015 en la Macrozona Central de Chile (MZC) para evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico “Sistema Multiescala de Modelación de Química y Transporte Atmosférico” (en inglés, “Multiple-Scale Atmospheric Transport and Chemistry Modeling System”, MATCH), desarrollado y ejecutado por el Instituto Sueco de Hidrología y Meteorología (SMHI). La evaluación arrojó los siguientes resultados: las concentraciones modeladas de O_3 estuvieron sobrestimadas en un 80% promedio, las de SO_2 estuvieron sobrestimadas en 4 de los 5 sitios en donde se monitoreó, en un 273% promedio, las de $MP_{2,5}$ Primario estuvieron sobrestimadas en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó, en un 78% promedio, las de NH_3 estuvieron sobrestimadas en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó, en un 31% promedio y las de NO_2 estuvieron subestimadas en un 48% promedio. Estos márgenes se justifican por: 1) diferencias en la metodología utilizada en los inventarios de emisiones de las regiones que abarcan la MZC (V, VI y XIII región), ya sea por la utilización de distintos modelos, por la desinformación existente con respecto a una fuente emisora, o por establecer ciertas consideraciones al momento de calcular las emisiones anuales de los contaminantes atmosféricos criterio de una determinada fuente emisora, 2) la inexistencia del parámetro meteorológico “nubosidad” en los productos entregados por el modelo de pronóstico meteorológico “Weather Research and Forecasting Model” (WRF) a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Este Trabajo de Titulación evidenció la necesidad de una “pauta” y una periodicidad para el desarrollo de los inventarios de emisiones de las distintas regiones de Chile, y la necesidad ampliar la gama de productos entregados por el WRF a la DMC.

1. INTRODUCCIÓN

Al evaluar problemas de contaminación atmosférica es necesario utilizar un enfoque sistémico, el cual involucre varias herramientas. Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos son una de las herramientas necesarias para tratar la contaminación atmosférica. En Chile, se han utilizado en más de una ocasión en la evaluación de problemáticas ambientales puntuales, como por ejemplo, en la evaluación de la “Dispersión Regional de Azufre Oxidado en Chile Central”, utilizando el sistema HIRLAM-MATCH, y más recientemente, en la evaluación del “Aporte Interregional a las Concentraciones de $MP_{2,5}$ en la RM”, utilizando el sistema WRF-MATCH (ver figura 1.1). Dado su relevancia en este enfoque sistémico es que se hace necesario evaluar la precisión de los modelos de dispersión atmosférica, comparando datos modelados con datos monitoreados.

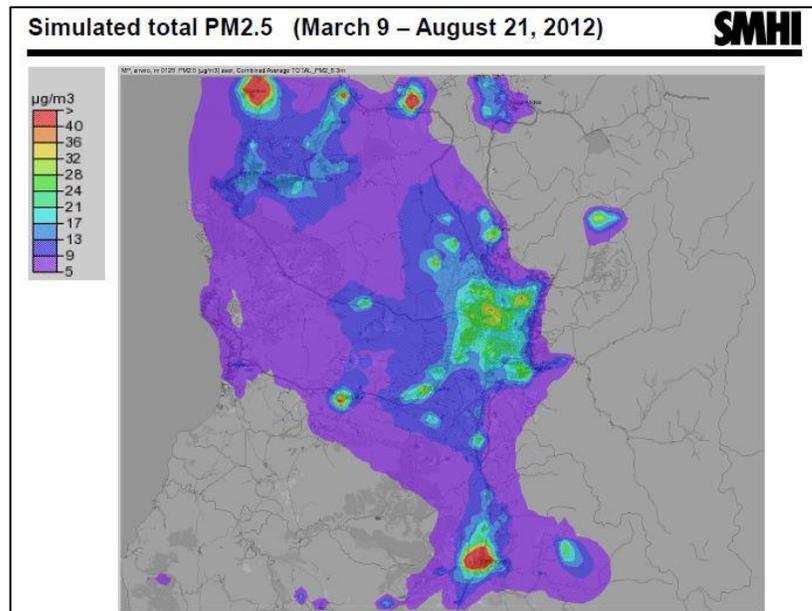


Figura 1.1: Imagen de una simulación del WRF-MATCH del $MP_{2,5}$ total en la MZC, durante el 09/03/12 y el 21/08/12, correspondiente al proyecto “Aporte Interregional a las Concentraciones de $MP_{2,5}$ en la RM”. Fuente: CMMCh.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Monitorear con equipos de muestreo continuo y con muestreadores pasivos durante los meses de mayo y agosto del año 2015 en la MZC para evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico “Sistema Multiescala de Modelación de Química y Transporte Atmosférico” (en inglés, “Multiple-Scale Atmospheric Transport and Chemistry Modeling System”, MATCH), desarrollado y ejecutado por el SMHI.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Monitorear con equipos de muestreo continuo y con muestreadores pasivos en la MZC.
- B. Procesar cuantitativa y cualitativamente los datos adquiridos en el punto A.
- C. Comparar el procesamiento de los datos adquiridos en el punto B con la representación entregada por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.
- D. Evaluar el modelo de dispersión fotoquímico MATCH, en función de la comparación del punto C.
- E. Discutir la evaluación del punto D.
- F. Conclusiones finales en torno a la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH.

1.3 FUNDAMENTACIÓN

El objetivo de evaluar el modelo de dispersión fotoquímico MATCH se basa en el siguiente hecho:

- El monitoreo *per se* presenta tres principales desventajas: 1) es sólo local, impidiendo su proyección en el área circundante, 2) no es proyectable en el tiempo, y 3) es costoso, especialmente en áreas de difícil acceso. Es por esto que se utilizan modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, como una herramienta para potenciar la visión sistémica de la problemática de la calidad del aire. El modelo de dispersión fotoquímico MATCH es el más utilizado, ya que se puede configurar con un número arbitrario de niveles verticales, de diferentes áreas geográficas y con diferente resolución espacial, haciendo mucho más representativa la simulación. Además, este modelo de dispersión posee un módulo fotoquímico, el cual permite modelar contaminantes secundarios, como lo es el Ozono troposférico. Este modelo de dispersión fotoquímico ha sido aplicado a una serie de evaluaciones ambientales, y como herramienta de investigación, tanto en Chile como a nivel global. Es por ello la necesidad de respaldar, a través de una campaña de monitoreo, los escenarios proyectados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.

1.4 HIPÓTESIS

Al comparar los datos monitoreados con los simulados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH, podrían existir diferencias porcentuales (subestimación o sobrestimaciones). Esto podría justificarse por cuatro motivos:

- La falta del parámetro meteorológico “nubosidad” en la información meteorológica requerida por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH. Este hecho repercutiría en la simulación de la fotoquímica de la atmósfera, evidenciándose de dos maneras: 1) oxidaciones demasiado rápidas de contaminantes primarios y precursores, y/o 2) mezcla sobrestimada durante el día y subestimada durante la noche.
- La utilización de diferentes metodologías en los distintos tipos de fuentes emisoras presentes en el inventario de emisiones de la V, VI y XIII región.
- Que las empresas (independiente de su rubro) tengan un nivel de actividad¹ distinto al declarado, o que no estén cumpliendo con la eficiencia de abatimiento² autoimpuesta, subestimando (o sobrestimando, dependiendo del caso) su emisión de contaminantes atmosféricos, lo cual alteraría el inventario de emisiones de su región.
- La resolución espacial utilizada por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH sería insuficiente en el caso de que el sitio de monitoreo se encuentre cerca de una Mega Fuente.

1.5 METODOLOGÍA

- Diseño de la grilla espacial en la MZC.
- Selección del punto de monitoreo pasivo y activo representativo de cada cuadrante de la grilla.

¹ Datos basados en procesos (en general, producción, horas de operación, área superficial) o en datos basados en censos (en general, población, número de empleados).

² Porcentaje ponderado de la reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos de un proceso industrial en particular. Mayores detalles en AP-42 de la US EPA.

- Monitoreo activo y pasivo en cada punto seleccionado.
- Generación de archivos en Microsoft Excel³ del desglose por fuente emisora del inventario de emisiones de la V, VI y XIII región.
- *Subir* los archivos generados en Microsoft Excel a la plataforma virtual Airviro⁴.
- Ejecución del modelo de dispersión fotoquímico MATCH por parte del SMHI.
- Comparación cuantitativa y cualitativamente de los datos monitoreados y los simulados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.
- Conclusiones y sugerencias en torno a la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH.

³ Aplicación distribuida por Microsoft Office para hojas de cálculo utilizado en tareas financieras y contables.

⁴ Sistema integrado para el manejo de datos de series de tiempo, inventarios de emisiones y modelación de dispersión, creado por el SMHI.

2. MACROZONA CENTRAL DE CHILE

Se denomina MZC al área comprendida entre la V Región de Valparaíso, la RM y la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins (**ver figura 2.1**). Esta área tiene una superficie total de 48.110 [km²]. Según proyecciones del INE ^[1], al año 2015, la MZC tendrá una población total de 10.058.684 [h] (V región: 1.825.757 [h], RM: 7.314.176 [h] y VI región: 918.751 [h]). Según estas mismas proyecciones de población, las cuales consideran la dinámica de la población, su fecundidad y mortalidad, al año 2020, cerca del 56% de la población total de Chile vivirá en la MZC (10.589.412 [h]). He ahí la relevancia que adquiere evaluar un modelo de dispersión fotoquímico de escala regional como lo es el MATCH.



Figura 2.1: Imagen satelital de la MZC. En color blanco, el nombre de las ciudades más pobladas de la MZC (de norte a sur: Valparaíso, Santiago y Rancagua). Fuente: Google Earth.

2.1 TOPOGRAFÍA Y CLIMA

La topografía de la MZC está caracterizada, de este a oeste, por los siguientes hitos geográficos: Cordillera de Los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales.

En la Cordillera de los Andes se encuentran cumbres que sobrepasan los 5.000 [m.s.n.m.]⁵. Desde la RM comienza a disminuir en altura, manifestándose un cordón más bajo, llamado precordillera. En las cuales se presentan reservas forestales. En esta zona se concentran las áreas de volcanismo.

En la relación a la Depresión Intermedia, al norte de Petorca se aprecian los últimos valles transversales. Del río Aconcagua al sur, se presentan cuencas, como la de Santiago y Rancagua, que son lugares planos rodeados de cerros que lo encajonan, pero son más anchos que los valles transversales. Al sur de la cuenca de Rancagua, la depresión se manifiesta continua y sin interrupciones. Se presenta como una llanura fértil que permite el desarrollo de la actividad agropecuaria.

La Cordillera de la Costa vuelve a tomar forma continua, pero disminuyendo su altura hacia el sur. A la altura de Maule, se divide en dos cordones paralelos, entre los cuales se presentan microclimas que permiten la agricultura.

Las Planicies Litorales comienzan a ampliarse, confundándose con la Cordillera de la Costa, permitiendo el desarrollo agrícola. Sin embargo, el avance de las dunas hace perder territorio.

⁵ Metros sobre el nivel del mar.

La MZC posee una estación seca que dura entre 6 y 8 meses (últimamente entre los meses de octubre y mayo), situación que impide la deposición húmeda de los contaminantes acumulados en la atmósfera durante estos meses. El promedio de las amplitudes térmicas es de 8°C, lo que indica temperaturas muy regulares durante el año. Las lluvias aumentan y las temperaturas disminuyen a medida que se avanza al sur. Donde la Cordillera de la Costa es más alta, las temperaturas son más altas y las precipitaciones más bajas. Sin embargo, en la Cordillera de Los Andes las lluvias aumentan y las temperaturas bajan. Cabe señalar que la mayor parte del año, la MZC es influenciada por el anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, lo que resulta en una inversión térmica de subsidencia y un clima semiárido.

En resumen, la topografía y el clima de la MZC son en general desfavorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos, especialmente durante la época invernal (**ver figura 2.2 y 2.3**).



Figura 2.2: Fotografía de la cuenca de Rancagua desde el *Camino del Cobre* ($34^{\circ}11'45''$ S, $70^{\circ}34'47''$ O), en dirección al pueblo de Coya, el día miércoles 13/05/15, a las 13:20 hrs. Se puede observar cómo la cuenca de Rancagua se encuentra encajonada entre la Cordillera de la costa (al fondo de la fotografía) y la Cordillera de Los Andes (al frente de la fotografía), situación totalmente desfavorable para la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos en una de las zonas más pobladas de la MZC. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.3: Fotografía de la cuenca de Santiago desde el Cerro San Cristóbal ($33^{\circ}25'32''$ S, $70^{\circ}38'0''$ O) el día martes 30/06/15, a las 13:40 hrs. Dado que la cuenca de Santiago se encuentra encajonada por el Cordón de Chacabuco (al fondo de la fotografía) por el norte, la Cordillera de los Andes por el oriente, la Angostura de Paine por el sur y la Cordillera de la Costa, la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos en la zona con el principal núcleo urbano del país es sumamente desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

2.2 PRINCIPALES FUENTES EMISORAS

Para comprender el por qué evaluar un modelo de dispersión fotoquímico de escala regional, se debe conocer tanto la dimensión como la dinámica de las emisiones de contaminantes atmosféricos de la MZC. Para ello se elaboró una tabla resumen de los inventarios de emisiones de cada una de las regiones que abarcan la MZC, definiendo qué sector o categoría, dependiendo del glosario del inventario, incide con mayor preponderancia en la concentración de los contaminantes atmosféricos en cada una de ellas, para así desarrollar con mayor certeza y eficacia el diseño del monitoreo, tanto activo como pasivo, en la MZC.

La tabla 2.1 es un resumen de todas las emisiones de la RM, clasificadas según sector económico:

Tabla 2.1: Resumen del inventario de emisiones de la RM. Fuente: Estudio “Actualización y Sistematización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana”, elaborado por el Departamento de Física de la USACH en Abril de 2014.

Sector Económico	Contaminante Atmosférico [ton/año]									
	MP ₁₀	MP _{2,5}	NO _x	SO _x	HCt	COV's	CO	CH ₄	NH ₃	CO ₂
Industrial	742	662	4,921	1,990	-	23	1,139	-	-	1,519,714
Residencial	2,186	2,077	1,785	294	-	53,550	20,292	1,626	193	281,988
Evaporativas	-	-	-	-	-	28,424	-	-	-	-
Agrícola	205	183	80	15	-	15,031	2,214	88,071	33,395	242,571
Transporte	2,877	2,398	39,356	239	14,146	-	125,727	-	2,114	10,401,297
Construcción	568	534	5,244	6	1,002	-	5,423	-	-	681,638
Total	6,578	5,854	51,386	2,544	15,148	97,028	154,795	89,697	35,702	13,127,208

De la tabla anterior se desprende que los sectores “Residencial” y “Transporte” son los que más aportan a las emisiones de MP₁₀ y MP_{2,5}, con un 33,2% y 43,7%, en el caso del MP₁₀, y con un 35,5% y 41,0% en el caso del MP_{2,5}, respectivamente. Por otra parte, la categoría “Transporte” es la que más aporta a las emisiones de NO_x, con un 76,6%, mientras que la categoría “Residencial”

es la que más aporta a las emisiones de COV's, con 55,2%. El sector "Agrícola" representa el 93,5% del total de emisiones de NH₃, situación que se condice con la descripción geográfica de la MZC expuesta en el punto 2.1: "Topografía y Clima".

La tabla 2.2 es un resumen de todas las emisiones de la V Región de Valparaíso, clasificadas según categoría de la fuente:

Tabla 2.2: Resumen del inventario de emisiones de la V región. Fuente: Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica Región de Valparaíso. Construcción de un Inventario de Emisiones Regional, elaborado por Ambiosis, Universidad de Playa Ancha, SMHI, Apertum IT AB y Geadur en Diciembre de 2011.

Categoría de la Fuente	Contaminante Atmosférico [ton/año]						
	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	COV's	SO _x	NH ₃
Fijas Combustión	3,784.06	2,727.17	1,918.78	18,752.78	181.24	17,906.70	1,216.48
Fijas Procesos + Evaporativas	3,655.89	2,812.90	725.18	2,105.15	1,161.71	33,818.35	106.38
Combustión de Leña	2,815.23	2,727.78	26,256.00	194.92	23,792.86	30.16	167.91
Otras Residenciales	7.70	2.11	45.96	182.84	11,556.09	14.03	1,673.29
Evaporativas Comerciales + Combustión Comercial	17.16	14.81	40.68	9.05	6,274.62	1.81	-
Quemas Agrícolas	107.26	102.42	894.95	34.07	67.93	7.87	-
Otras Areales	20.67	5.61	179.48	4.22	24,440.77	-	6,367.48
Total Estacionarias	10,407.97	8,392.80	30,061.03	21,283.03	67,475.22	51,778.92	9,531.54
Total Fuentes Móviles Vehículos Livianos	266.94	245.58	60,436.54	9,472.00	7,346.88	95.60	413.25
Total Fuentes Móviles Vehículos Pesados	456.98	420.42	2,443.25	10,926.35	853.36	227.42	3.54
Fuera de Ruta	326.64	317.92	1,749.14	7,222.50	330.71	3,949.73	0.0023
Total Móviles	1,050.56	983.93	64,628.93	27,620.86	8,530.96	4,272.75	416.79
Total Estacionarias + Móviles	11,458.53	9,376.73	94,689.96	48,903.89	76,006.18	56,051.67	9,948.32

De la tabla anterior se desprende que las categorías "Fijas Combustión", "Fijas Procesos + Evaporativas" y "Combustión de Leña" son las que más aportan a las emisiones de MP₁₀, MP_{2,5}, SO_x y NO_x. Por otra parte, las categorías "Fuentes Móviles" y "Combustión de Leña" son las que más aportan a las emisiones de CO, con un 68,3% y 27,7% respectivamente, mientras que la categoría "Otras Areales" aportan significativamente a las emisiones de COV's y NH₃. Las emisiones de MP₁₀ provienen principalmente de la combustión externa

puntual, las cuales representan cerca del 60% de las emisiones totales de MP₁₀ de la región. Según el inventario de emisiones de la V región, las fuentes con mayor aporte son las termoeléctricas, seguidas muy de cerca de la producción primaria de cobre.

La tabla 2.3 es un resumen de todas las emisiones de la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, clasificadas según categoría de fuente:

Tabla 2.3: Resumen inventario de emisiones de la VI Región. Fuente: Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Calidad del Aire VI Región, elaborado por Ingeniería DICTUC en Enero de 2008.

Categoría de Fuente	Contaminantes Atmosférico [ton/año]						
	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	NO _x	COV's	SO _x	NH ₃
Industria (Otras)	240.27	177.48	837.74	2,686.82	20.69	2,928.34	386.20
Industria Cobre	1,676.40	1,420.95	552.53	2,381.44	48.25	116,489.80	65.90
Combustión de Leña	5,447.47	5,293.94	49,983.88	576.54	22,468.42	75.78	458.04
Otras Residenciales	2.90	2.90	15.39	73.62	3,805.73	9.80	239.96
Evaporativas Comerciales	-	-	-	-	8,987.98	-	-
Quemas Agrícolas	1,536.83	1,469.17	9,924.95	433.18	898.30	57.07	-
Incendios Forestales	3,372.16	2,865.98	32,216.67	1,144.55	2,216.72	344.92	322.05
Otras Areales	5.72	4.53	19.62	0.46	41,295.06	-	136,228.54
Total Estacionarias	12,281.74	11,234.95	93,550.78	7,296.62	79,741.15	119,905.71	137,700.68
Buses Licitados	2.91	2.56	19.75	77.82	10.30	3.03	0.03
Otros Buses	66.45	44.17	303.05	1,340.75	116.65	41.77	0.84
Camiones	83.08	70.00	347.34	1,408.10	200.40	78.04	1.34
Vehículos Livianos	52.74	31.32	15,538.11	1,651.23	936.04	25.36	72.51
Fuera de Ruta	52.54	47.19	273.59	64.03	46.95	0.01	0.03
Total Móviles	257.71	195.25	16,481.83	4,541.94	1,310.34	148.21	74.75
Total Estacionarias + Móviles	12,539.45	11,430.20	110,032.61	11,838.56	81,051.49	120,053.91	137,775.44

De la tabla anterior se desprende que la categoría "Combustión de Leña" es la que más aporta a las emisiones de MP₁₀, MP_{2,5} y COV's, con un 43,4%, 47,1% y 27,7% respectivamente. Es por ello que el MMA ha propuesto una estrategia de control, enfocada principalmente en la calefacción residencial, a través de un programa de recambio de calefactores a leña [2]. Otras medidas paliativas son la elaboración de una norma de emisión para artefactos que usan leña y de un sistema nacional de certificación de leña. Por otra parte, la categoría "Industria

(Otras)” e “Industria Cobre” son las que más aportan a las emisiones de NO_x , con un 22,7% y un 20,1% respectivamente. Tal como se pudo observar, no son los vehículos motorizados los que más aportan a las emisiones de NO_x , como es el caso de la RM, ya que el parque de vehículos motorizados en circulación de la VI región equivale al 13% del de la RM [3]. La categoría “Industria Cobre” es la que más aporta a las emisiones de SO_x , con un 97,0%. Este hecho se justifica ya que, a 45 [km] al este de la ciudad de Rancagua (capital de la VI región), se ubica una fundición de la división El Teniente de Codelco, Caletones.

3. MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS⁶

La dispersión de contaminantes atmosféricos es un proceso complejo, para cuya evaluación es necesaria la aplicación de modelos. Los fenómenos que se desarrollan en la atmósfera no son controlables, ni reproducibles completamente en laboratorio. Por este motivo, los modelos de dispersión de contaminación atmosféricos son las herramientas más utilizadas en el estudio de la calidad del aire.

Las últimas directrices mundiales relativas a la calidad del aire, plantean un enfoque nuevo en la evaluación de la contaminación atmosférica, dando un importante uso a las técnicas de modelación, como una forma complementaria a las medidas que se realizan en la evaluación y gestión de la calidad del aire.

Un modelo fotoquímico es un modelo de dispersión capaz de simular los procesos de emisiones, transformaciones físicas y químicas y deposición de los

⁶ Capítulo desarrollado en base al documento “Aplicación Práctica del Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos”, creado por Agustín Torres para la Escuela de Organización Industrial.

distintos contaminantes atmosféricos transportados por los sistemas meteorológicos.

3.1 TIPO DE MODELOS

Los modelos que describen la dispersión y transporte de contaminantes atmosféricos pueden ser diferenciados por distintos campos:

1) Tipos básicos de modelos existentes:

- **Físicos:** Como representaciones a pequeña escala, como puede ser una réplica de una determinada área y el empleo de un túnel de viento.
- **Matemáticos:** Basados en sistemas conceptuales y principios físicoquímicos. A su vez, dentro de estos modelos se pueden distinguir dos grupos, los modelos determinísticos, basados en ecuaciones matemáticas (principalmente la ecuación de advección-difusión que representa los procesos atmosféricos) y los modelos empíricos, basados en relaciones estadísticas y empíricas entre los datos relativos a la contaminación (tanto los datos de emisión de la fuente emisora como los de calidad del aire) y otras variables que puedan tener influencia sobre ellas.

2) Escala espacial de aplicación:

- **“Street Canyon”:** Estiman las concentraciones a nivel de calle, teniendo en cuenta las influencias derivadas de los edificios. Se trabaja en dominios espaciales de cálculo inferiores a 1 [km] (microescala).

- **Escala Local:** El dominio habitual es de unos pocos kilómetros, hasta distancias de unos 20 [km] de las fuentes emisoras.
- **Local a Regional:** Se aplica a problemas de calidad del aire referidos al Ozono, donde las reacciones fotoquímicas entre COV's y NO_x tienen gran importancia. El dominio espacial de estudio puede estar definido entre 20 y 500 [km].
- **Regional a Continental (escala sinóptica):** Es en esta escala donde son de importancia los fenómenos meteorológicos de gran escala.
- **Global:** Simulan el transporte de contaminantes en toda la atmósfera terrestre. Se suele aplicar a estudios relativos de efecto invernadero, destrucción de la capa de Ozono, etcétera.

3) Escala Temporal:

- **Modelos Episódicos:** Cubren períodos temporales desde una hora a varios días. Su objetivo es predecir situaciones de contaminación atmosférica debidas a situaciones meteorológicas adversas.
- **Modelos Climatológicos:** Períodos de uno o varios años con objeto de estudiar la contaminación promedio en una zona.

Estos están asociados al tipo de modelo meteorológico:

- **Modelos Meteorológicos de Pronóstico:** Proporcionan una predicción de la evolución de la atmósfera a partir de unas condiciones de inicio y de contorno, y son por tanto modelos de mayor complejidad.

- **Modelos Meteorológicos de Diagnóstico:** Proporcionan un diagnóstico de las condiciones presentes en cada instante, a partir de datos registrados en estaciones meteorológicas. Los resultados de estos modelos son campos de diferentes parámetros meteorológicos obtenidos a partir de interpolaciones y/o extrapolaciones de las medidas meteorológicas disponibles.

4) Según el tratamiento de las ecuaciones de transporte:

- **Modelo Gaussiano:** Es el más común de los modelos de contaminación atmosférica. Este modelo asume que la distribución de la concentración de contaminantes dentro de la pluma tiene una distribución gaussiana.
- **Modelo Euleriano:** Este tipo de modelo se basa en una grilla fijada en el espacio. En cada punto de la celda de la grilla se calcula la advección y la dispersión de los contaminantes en base en los gradientes de concentración local. La dispersión es calculada con la ley de difusión de Fick, la cual establece que un flujo de difusión es proporcional al gradiente de concentración. Modelos de este tipo son exactos a grandes distancias, pero tienen baja resolución espacial (normalmente la celda tiene un área de 100 [km²], o más). Son exigentes computacionalmente hablando, y la potencia computacional se incrementa a medida que se incrementa la resolución espacial. Por otra parte, la física tras un modelo Euleriano, permite modelar a escalas más pequeñas, o sea de pocos kilómetros. La principal ventaja de este tipo de modelo, es de ser capaz de manejar una química compleja, a diferencia de modelos simples de dispersión. Este tipo de modelo se utiliza para las predicciones de la concentración del smog fotoquímico.
- **Modelo Lagrangiano:** Este modelo asume que cada fuente emite un gran número de partículas, y que cada una de ellas sigue una trayectoria

aleatoria alrededor del vector de viento promedio. Esta trayectoria se actualiza con cada lapsus de tiempo. La predicción de la concentración de contaminantes se obtiene contando el número de partículas en un determinado volumen de aire. Este tipo de modelo sigue potencialmente la física del aire dispersión mejor que cualquier otro. Por lo tanto, modelos de este tipo son muy precisos y pueden ser utilizados por largas distancias. Sin embargo, son muy exigentes computacionalmente hablando, ya que decenas de miles de partículas necesitan ser consideradas por cada fuente, haciéndolo práctico solo cuando existe un pequeño número de fuentes.

- **Modelos de Receptores:** En contraste con los modelos de dispersión, los modelos receptores comienzan con la observación de las concentraciones que llegan al receptor para posteriormente definir las fuentes que las provocan.

5) Según el tratamiento de distintos procesos:

- **Modelos Químicos o Fotoquímicos:** Incluyen módulos para el cálculo de las transformaciones químicas. Estos módulos incluyen desde las reacciones químicas hasta la descripción de las reacciones fotoquímicas más complejas.
- **Modelos de Deposición Húmeda o Seca.**

6) Según el fin para el cual se empleen:

- **Propósito de Regulación:** Aplicable en estudios de evaluación de impacto ambiental y estudios de contaminación atmosférica industrial.

- **Apoyo de Decisiones Políticas:** Aplicable en la regulación urbanística e industrial.
- **Información Pública:** Aplicable en la definición de redes de calidad del aire y como complemento de la información de la calidad del aire existente.
- **Investigación Científica:** Aplicable en el desarrollo de estudios científicos, tales como cambio climático, Ozono troposférico, acidificación, eutrofización, smog fotoquímico, etcétera.

Todos los modelos descritos anteriormente, independiente de sus características, resuelven la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -c\nabla \cdot v - v \cdot \nabla c - \nabla \cdot (\langle c'v' \rangle) + Q - S \quad \mathbf{[3.1]}$$

donde c es la concentración de una traza medida en $[\text{kg}/\text{m}^3]$, v el vector velocidad del viento medido en $[\text{m}/\text{s}]$, ∇ indica la variación respecto del espacio, $\partial c/\partial t$ la variación local en el tiempo de la concentración promedio de una traza, $-v \cdot \nabla c$ la advección de masa por efecto del viento promedio, $\nabla \cdot (\langle c'v' \rangle)$ la divergencia del flujo turbulento de la traza, Q las fuentes promediadas y S los sumideros promediados.

A continuación un esquema de las etapas de selección, implementación, ejecución y evaluación de un modelo de dispersión atmosférica:

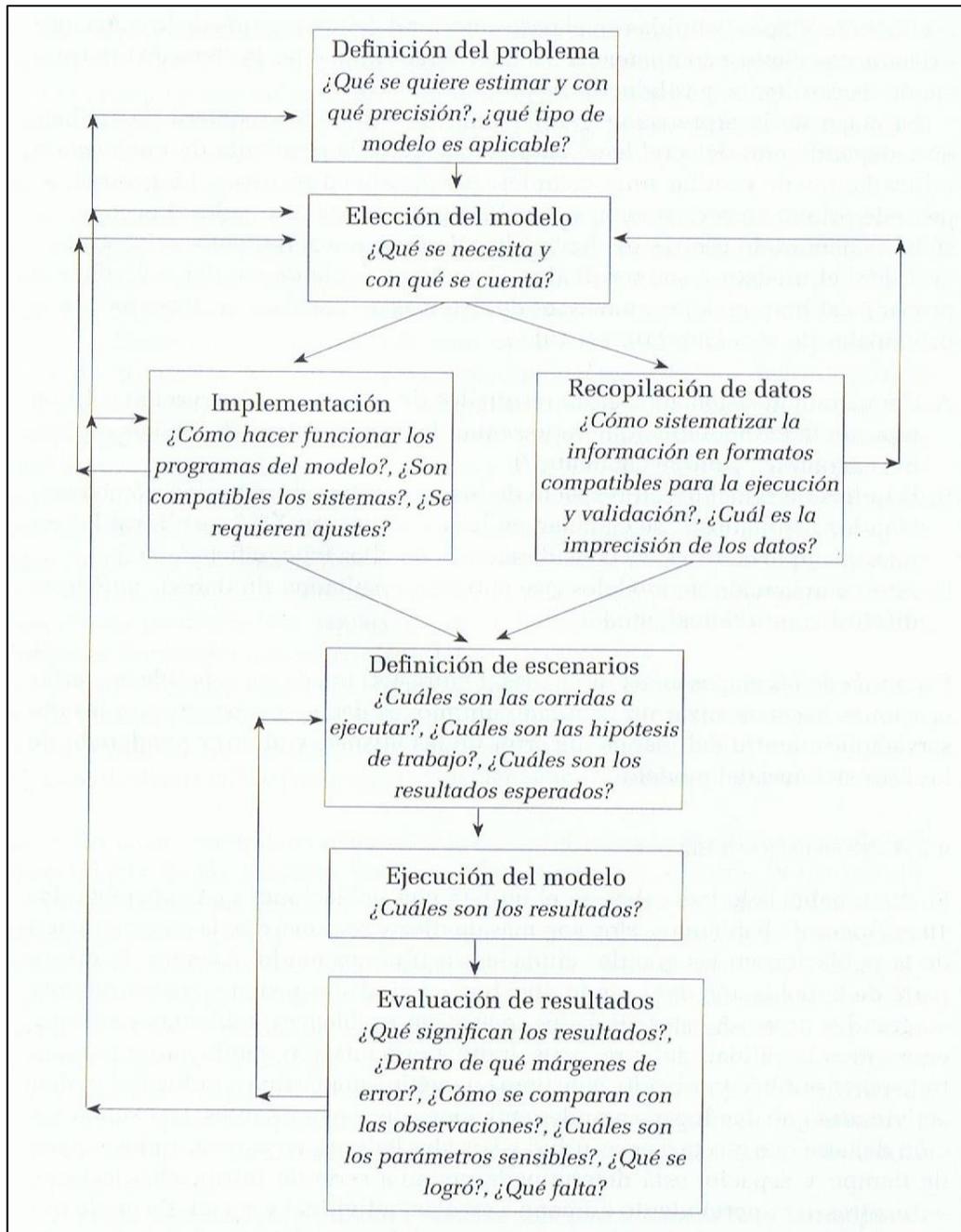


Figura 3.1: Esquema de las etapas de selección, implementación, ejecución y evaluación de un modelo de dispersión atmosférica. Fuente: Gallardo, 2006.

3.2 COMPONENTES DE UN MODELO

Son 4 los módulos que componen un modelo de dispersión atmosférica. A continuación se describen resumidamente cada uno de estos módulos:

- **Módulo de Emisiones:** En la mayoría de las ocasiones la información de la intensidad con que se está emitiendo el contaminante atmosférico se obtiene de mediciones directas, pero en otras ocasiones, hay que proceder al empleo de estimación de datos mediante la aplicación de factores de emisión o modelos de emisión.
- **Módulo Meteorológico:** Son los módulos que estiman los campos de vientos y otras variables meteorológicas que aportan la información sobre el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos.
- **Módulo Fotoquímico:** Estos módulos incorporan las ecuaciones de transformación químicas implicadas en la aparición de los contaminantes secundarios (como el Ozono troposférico), en función de diversos parámetros, cómo la concentración de otros compuestos catalizadores de la reacción o variables meteorológicas específicas.
- **Módulo de Deposición:** Mediante ecuaciones y parametrizaciones específicas aportan la información de cuando, cuanto y donde los contaminantes atmosféricos emitidos son eliminados de la atmósfera.

4. MODELO DE DISPERSIÓN FOTOQUÍMICO MATCH

El modelo de dispersión fotoquímico MATCH es el más utilizado, ya que se puede configurar con un número arbitrario de niveles verticales, de diferentes áreas geográficas y con diferente resolución, haciendo mucho más representativa la simulación. Este modelo de dispersión fotoquímico fue desarrollado en el SMHI.

El modelo de dispersión fotoquímico MATCH para su ejecución requiere de las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Monóxido de Carbono (CO), Amoníaco (NH_3), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), Isopreno (C_5H_8) y Material Particulado 2,5 ($\text{MP}_{2,5}$).

El modelo de dispersión fotoquímico MATCH entrega como resultado las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Ozono (O_3), Amoníaco (NH_3), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO_2), Material Particulado 2,5 Primario (Carbono Elemental más la fracción hidrocarburada de los Aerosoles Orgánicos) y Aerosoles Inorgánicos Secundarios.

4.1 ESTRUCTURA MATCH

El modelo de dispersión fotoquímico MATCH es un modelo tridimensional de tipo "off-line", lo cual significa que los parámetros meteorológicos son tomados de alguna fuente externa y se introducen en el modelo a intervalos de tiempo regulares, normalmente cada 3 o 6 horas. Estos datos suelen ser interpolados en el tiempo para obtener los datos por hora. Se presta especial atención a la interpolación del viento horizontal. El viento vertical se calcula internamente para asegurar la consistencia de masa del movimiento atmosférico.

Las especies traza⁷ son representadas como razones de mezcla de masa y proporciones de mezcla de límites prescritos, que se tratan de la misma manera que los parámetros meteorológicos, es decir, se leen e interpolan a intervalos de tiempo regulares.

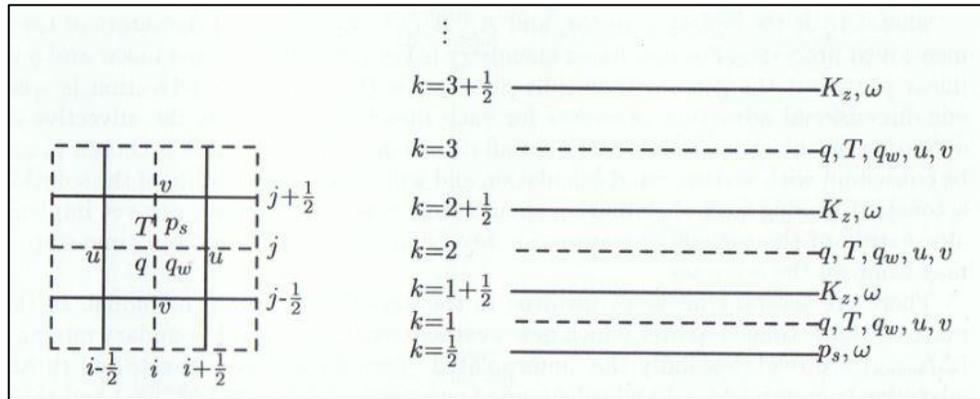


Figura 4.1: Escalonamiento de las variables en la horizontal (izquierda) y en la vertical (derecha), donde u , v , w son las componentes del viento, T la temperatura, q es la componente de la razón de mezcla modelada, q_w razón de mezcla del vapor de agua y K_z el coeficiente de intercambio.

El diseño del modelo es flexible con respecto a la resolución horizontal y vertical, definido principalmente por los parámetros meteorológicos de entrada, y permite modelar un número arbitrario de compuestos químicos. El modelo está escrito en coordenadas verticales η que es una combinación lineal de la presión, p , y las coordenadas verticales σ , donde las coordenadas σ se definen como:

$$\sigma_i = \frac{p_i}{p_s} \quad [4.1]$$

donde p_s es la superficie de presión, e i hace referencia a cada capa vertical, así:

⁷ Entiéndase por “Especie Traza” como contaminante atmosférico.

$$\eta_i = \frac{\alpha_i + \beta_i p_s}{p_s} \quad [4.2]$$

4.2 TIME-SPLITTING

Los procesos físicos que tienen que ser considerados para conocer el destino de una especie traza en la atmósfera son las vías de inyección de las emisiones antropogénicas y/o naturales a la atmósfera (A_Q), el transporte a través del movimiento del fluido ($A_u + A_v + A_w$) y remolinos turbulentos (A_T), la transformación mediante reacciones químicas (A_{CH}), y el agotamiento a través de sedimentación gravitacional y por procesos de deposición húmeda y seca (A_D). Las especies traza se consideran “no flotantes” (excepto durante la fase muy inicial de liberación cuando la flotabilidad puede explicarse), y los datos meteorológicos de entrada se supone que representan alguna escala de tiempo mayor que la de vida de los remolinos turbulentos, los cuales tienden a ser tratados de forma paramétrica. El esquema de procedimiento de *time-split* se aplica en las ecuaciones 4.3 y 4.4, donde las razones de mezcla, q , se actualizan secuencialmente para cada proceso.

$$q^* = q^n + A_Q \quad [4.3]$$

$$q^{n+1} = A_{CH}(A_u + A_v + A_w)A_D A_T q^* \quad [4.4]$$

donde A_Q es el vector de emisión, y A_T , A_D , etcétera, son los operadores lineales de los procesos mencionados anteriormente. La advección⁸ se divide en procesos de advección unidimensionales para cada dirección. Hay que tener en cuenta que el paso advectivo está operando en las mismas proporciones de mezcla para todas las direcciones. Este procedimiento se elige con el fin de ser

⁸ Variación de un escalar en un punto dado por efecto de un campo vectorial. En este caso, el escalar es la concentración del contaminante atmosférico, y el campo vectorial el viento.

consistentes con el cálculo vertical del viento y se asegurará la estabilidad de la solución, por ejemplo, una distribución de relación de mezcla constante debe permanecer constante.

Hay varios *time-step* implicados en el flujo de datos a través del modelo. En primer lugar, el lapsus de tiempo durante el cual los nuevos datos meteorológicos (Δt_{met}) y las proporciones de mezcla de contorno (Δt_{bound}) se leen. En segundo lugar, el período de interpolación (normalmente 1 hora), y en tercer lugar el *time-step* y *substepping advective* sobre difusión vertical (Δt_{vdiff}) y el esquema de reacción química (Δt_{chem}) (ver figura 4.2).

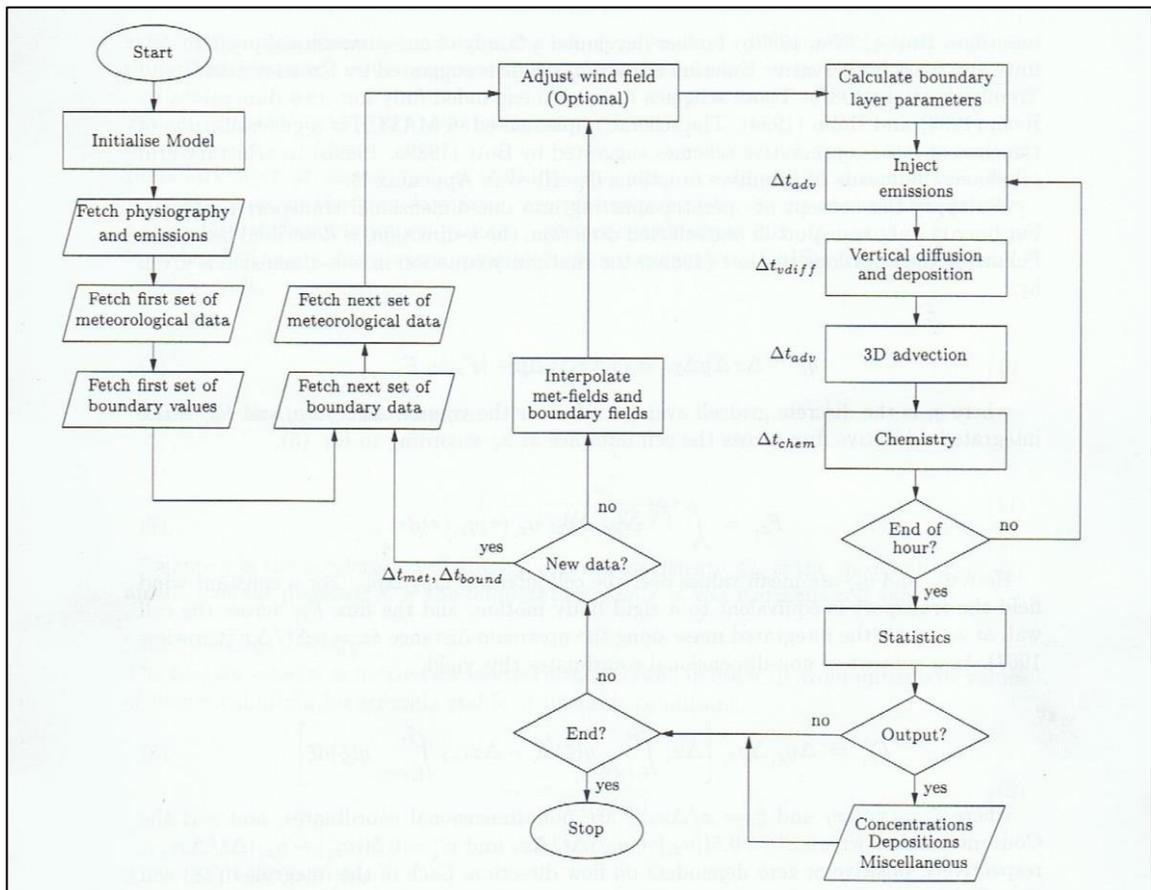


Figura 4.2: Esquema de los distintos *time-step* implicados en el flujo de datos del modelo de dispersión fotoquímico MATCH. Fuente: SMHI.

Se implementó el modelo de dispersión fotoquímico MATCH en la MZC considerando una resolución temporal de 1 hora y un dominio, o área de modelación, con una resolución espacial de 2 x 2 [km]. Dicho dominio tiene las siguientes dimensiones: 210 [km] en la dirección este-oeste y 166 [km] en la dirección norte-sur. Las características generales de este dominio se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características generales del dominio de modelación utilizado por el MATCH. Fuente: Elaboración propia.

Características Generales del Dominio de Modelación Utilizado por el MATCH	
Resolución Espacial	2 x 2 [km]
Número de Celdas en Dirección X	105
Número de Celdas en Dirección Y	83
Coordenadas Geográficas del Centro del Dominio	Longitud: -71.998
	Latitud: -34.280
Número de Niveles Verticales	38
Altura del Tope del Dominio	~40 [km]
Proyección del Mapa	WGS84

El modelo de dispersión fotoquímico MATCH utiliza un sistema de “High Performance Computing” (Computación de Alto Rendimiento) en el Centro Nacional de Súper Computación de Suecia. El SMHI dispone de un “4,272 core-clúster”. La simulación del modelo de dispersión MATCH utiliza normalmente 64 cores (4 nodes). Las variables de salida (series de tiempo de grillas 2D) para MZC fueron de 2 gigas en total.

4.3 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS COMO VARIABLE DE ENTRADA DEL MATCH

El modelo numérico utilizado es el “Weather Research and Forecasting Model” (WRF), en su versión 3.1.1, el cual representa las variables de la atmósfera en una grilla tridimensional de alta resolución, cuyos niveles verticales siguen la

topografía. El modelo tiene una amplia gama de opciones para las parametrizaciones físicas que representan importantes procesos como por ejemplo, interacciones suelo-atmósfera, radiación solar, física de las nubes, precipitación, y turbulencia. El modelo WRF, mantenido por el “National Center for Atmospheric Research (NCAR)”, es un modelo de escala regional, que usualmente es inicializado y forzado por las condiciones de borde definidas por datos meteorológicos de modelos globales de menor resolución. Además, es una de las herramientas de análisis del potencial ampliamente usada a nivel internacional.

Cabe señalar que los parámetros meteorológicos son fundamentales en la modelación de la dispersión atmosférica del contaminante criterio, ya que determinan su mezcla vertical y su dispersión horizontal.

Adicionalmente, se realizaron mediciones de temperatura a 3 diferentes alturas de la Torre DASA, la cual está ubicada en la comuna de Pudahuel y pertenece a la DMC, durante octubre del año 2013 y octubre del año 2014. Este parámetro meteorológico potencia la modelación, ya que es un estimador de la estabilidad atmosférica.



Figura 4.3: Torre DASA, comuna de Pudahuel. A lo largo de esta torre fue donde se monitoreó el “difftem”. Fuente: DMC.

Para la simulación se emplearon las opciones estipuladas en siguiente tabla 4.2:

Tabla 4.2: Principales características del *Dominio 2* del modelo WRF utilizado para las simulaciones de los parámetros meteorológicos como variable de entrada del modelo de dispersión fotoquímico MATCH. Fuente: Elaboración propia.

Dominio	
Resolución Espacial	2 x 2 [km]
Numero de Celdas en Dirección X	352
Numero de Celdas en Dirección Y	349
Coordenadas Geográficas del Centro del Dominio	Longitud: -73.6272
	Latitud: -33.2251
Área Total del Dominio	~4,464,369 [km ²]
Física	
Variable	Opción Escogida
Esquema de Radiación	Onda Larga: RRTM
	Onda Corta: Dudhia
Modelo de Suelo	5-Layer Thermal Diffusion
Tratamiento de Capa Superficial	MYNN
Parametrización de la Capa Límite	Esquema MYNN2
Esquema de Convección	Grell 3D
Microfísica de Nubes y Precipitación	Esquema WSM3
Integración Temporal	
Resolución Temporal	1 hora
Periodo de Simulación	09/03/12 al 21/08/12

Para mayores detalles acerca de las parametrizaciones de los procesos físicos se recomienda consultar a Skamarock *et al.* 2005.

4.4 INVENTARIO DE EMISIONES COMO VARIABLE DE ENTRADA DEL MATCH

El inventario de emisiones es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire. Un inventario permite conocer las fuentes emisoras de

contaminantes atmosféricos, así como el tipo y cantidad que emite cada una de ellas.

A continuación se detalla el modelo y/o metodología utilizada en cada fuente de emisión más relevantes del inventario de emisiones de la V, RM y VI región:

Tabla 4.3: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora, productos esperados y aplicaciones para el inventario de emisiones de la V Región. Fuente: Inventario de emisiones V región.

Tipo de Fuente Emisora	Modelo/Metodología Usado	Productos Esperados del Estudio en Emisiones
Quema de biomasa		<ul style="list-style-type: none"> • Integración base de datos de emisiones EDB en AIRVIRO (Georreferenciado y espacialmente distribuido) • Inventario de emisiones agregado • EDB AIRVIRO parametrizada mediante el uso de grupo de sustancias y fuentes móviles en nuevo formato definido por SINCA • Documento de fundamentación del inventario: que indique metodologías, factores de emisión, fuentes de información de cada parámetro y nivel de actividad
Quema Residencial y Comercial de Leña	Metodología de quema de leña y carga como grupo de sustancias a AIRVIRO	
Quemas Agrícolas	Modelo en planilla Excel y carga como grupo de sustancias a AIRVIRO	
Incendios Forestales	Modelo en planilla Excel y carga como grupo de sustancias a AIRVIRO	
Transporte		
Transporte de Carga	Bottom UP: AIRVIRO actualizado a la versión MODEM V5.0 de SECTRA (emisiones en ruta)	
Transporte Público		
Vehículos Livianos	<p>Top Down: Metodología dependiente de kilómetros recorridos y parque vehicular</p> <p>Top Down: MODEM II (Evaporativas)</p>	
Emisiones Industriales		
Grandes	Formulario 138, Modelo en	

Industrias	planilla Excel, TANKS, AIRVIRO	
Otras Industrias	Formulario 138, Modelo en planilla Excel, AIRVIRO	
Emisiones Biogénicas	GloBEIS (Global Biosphere Emissions and Interactions System) version 3.0	
Emisiones de Polvo		
Resuspendido por Tráfico Calles Pavimentadas	AIRVIRO	
Resuspendido por Tráfico Calles sin Pavimentar	Modelo en planilla Excel y carga como grupo de sustancias a AIRVIRO	
Actividades Agrícolas		
Construcción		
Otras fuentes de polvo		
Otras Fuentes Menores		
Móviles fuera de ruta, etcétera	Modelo en planilla Excel y carga como grupo de sustancias a AIRVIRO	

Tabla 4.4: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora para el inventario de emisiones de la RM. Fuente: Inventario de emisiones RM.

Tipo de Fuente Emisora	Modelo/Metodología Usado
Emisiones Industriales	
Puntuales	Decreto Supremo n° 138 (Referencia: <i>MINSAL</i>)
Grupales	Base de datos "Fuentes Fijas" (Referencia: <i>SEREMI de Salud, 2012</i>)
Residenciales	
Combustión de Leña (Salamandra, Estufa Simple, Estufa Doble Entrada, Chimenea Hogar Abierto, Chimenea Hogar Cerrado, Caldera a Leña, Estufa a base de Pellet, Cocina a Leña,	$E_{ca} = FE_{ca} \cdot N_a \cdot A_{ca} \cdot M_h \cdot M_o \cdot M_l$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{ca}: Emisiones del contaminante "c" en estudio, proveniente del artefacto "a" [ton/año].

Otros)	<ul style="list-style-type: none"> • FE_{ca}: Factor de emisión del contaminante “c” para el artefacto “a” para la leña [ton/kg]. (Referencia: <i>Informe AP-42, US EPA</i>) • N_a: Número de artefactos del tipo “a” en cada comuna. • A_{ca}: Nivel de actividad para el contaminante “c” y el artefacto tipo “a” definido por el consumo anual de combustibles para ese artefacto. (Referencia: <i>CDT</i>) • M_h: Modificador relacionado con la humedad de la leña. (Referencia: <i>Environment Ontario</i>) • M_o: Modificador relacionado con la operación del artefacto. (Referencia: <i>CMMCh</i>) • M_l: Modificador relacionado con el tipo de leña. (Referencia: <i>Environment Ontario y Ambiente Consultores</i>)
Combustión de GLP	$E_c = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_c: Emisiones del contaminante “c” en estudio, por comuna [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión del contaminante “c”, en función del tipo de combustible utilizado [ton/kg]. (Referencia: <i>Inventario de Emisiones RM año 2005</i>) • A_c: Consumo anual del combustible por comuna para el artefacto. (Referencia: <i>SEC</i>)
Combustión de Gas Natural	
Gas de Ciudad	
Combustión de Parafina	
Solventes	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's, por comuna [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión de COV's, en función del tipo de producto utilizado [kg/personas]. (Referencia: <i>Informe AP-42, US EPA</i>) • A_c: Nivel de actividad; Población proyectada. (Referencia: <i>INE, 2012</i>)
Pinturas	
Fugas de GLP	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$

	<p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión de COV's; Porcentaje de pérdida del consumo total de GLP. (Referencia: <i>Informe Estadístico 2012, SEC, más Estudio de PEMEX</i>) • A_c: Nivel de actividad; Ventas a residencia de GLP en la RM. (Referencia: <i>Informe Estadístico 2012, SEC</i>)
Evaporativas	
Almacenamiento de Combustible	Programa "TANKS 4.0.9d", US EPA
Transporte de Combustible	Ecuación "Pérdida de Llenado", US EPA
Expendio de Combustible	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión de COV's, en función de la etapa del expendio. (Referencia: <i>Informe AP-42, US EPA</i>) • A_c: Nivel de actividad; Ventas de gasolinas (93, 95, 97) en la RM. (Referencia: <i>Informe Estadístico 2012, SEC</i>)
Lavasecos	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión [kg/habitante]. (Referencia: <i>Jochen Theloke, 2005</i>) • A_c: Nivel de actividad; Población proyectada. (Referencia: <i>INE, 2012</i>)
Pintado de Vehículos	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión [kg/habitante].

	<p>(Referencia: <i>Programa de Inventario de Emisiones de México año 2000, SERMANAT</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • A_c: Nivel de actividad; Población proyectada. (Referencia: <i>INE, 2012</i>)
Artes Gráficas	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión [kg/habitante]. (Referencia: <i>Informe AP-42, US EPA</i>) • A_c: Nivel de actividad; Población proyectada. (Referencia: <i>INE, 2012</i>)
Fugas Comerciales de GLP	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión; Porcentaje de pérdida. (Referencia: <i>Estudio Empresa Nacional de Petróleos Mexicanos año 2000, PEMEX</i>) • A_c: Nivel de actividad; Consumo total de GLP en la RM. (Referencia: <i>Informe Estadístico año 2012, SEC</i>)
Aplicación de Asfalto	$E_{COV} = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COV}: Emisiones de COV's en la RM [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión [kg/ton]. (Referencia: <i>Jochen Theloke, 2005</i>) • A_c: Nivel de actividad; Toneladas de asfalto utilizados en la RM para el año 2012. (Referencia: <i>MINVU y SERVIU</i>)
Agrícolas	
Quemas Agrícolas	<i>Tier 1, del documento Guía de Inventarios EMEP/EEA año 2013</i>
Incendios Forestales	$E_c = A \cdot FE_c$ <p>Donde:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • E_c: Emisiones del contaminante “c” en estudio [ton/año]. • A: Área quemada [ha]. (Referencia: <i>Registros Estadísticos de la CONAF</i>) • FE_c: Factor de emisión del contaminante “c” [kg/área]. (Referencia: <i>Guía para Inventarios EMEP/EAA 2013</i>) <p>Para emisiones de Material Particulado:</p> $E_c = A \cdot B \cdot \beta \cdot \alpha \cdot FE_c$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_c: Emisiones del contaminante “c” en estudio [ton/año]. • A: Área quemada [m²]. (Referencia: <i>Registros Estadísticos de la CONAF</i>) • B: Densidad total promedio de biomasa [kg/m²]. • β: Fracción de biomasa superficial [Adimensional]. • α: Eficiencia de quema [Adimensional]. • FE_c: Factor de emisión del contaminante “c” [g/kg de material quemado]. (Referencia: <i>Guía para Inventarios EMEP/EAA 2013</i>)
Emisiones Biogénicas	Programa “Modelo de Emisiones de Gases y Aerosoles de la Naturaleza”, versión 2.1
Fertilizantes y Plaguicidas	Metodología propuesta en el inventario especializado de NH ₃ desarrollado por Sistem Ingeniería para la Subsecretaría del Medio Ambiente, 2011
Crianza de Animales	Metodología propuesta por “ <i>Modelling of emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Agricultural Sources in Europe</i> ” (KlimontZ, 2004)
Rellenos Sanitarios	Modelo Landgem (US EPA, 2005)
Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas	$E_c = FE_a \cdot A_c$ <p>Donde:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • E_c: Emisiones del contaminante “c” en estudio, por planta de tratamiento [ton/año]. • FE_a: Factor de emisión del contaminante “c” [mg/Lt]. (Referencia: COV: <i>Stephen M. Roe, 2004</i>; NH_3: <i>EMEP, 2006</i>) • A_c: Nivel de actividad; Caudal anual de agua tratada por cada planta del catastro de la SISS.
Transporte	
En Ruta	Como base, los outputs TSANT2 (fuentes Road), para luego realizar una grilla de emisiones utilizando un promedio de factores de emisión para toda la flota y el flujo vehicular acumulado al año 2012
Fuera de Ruta	Transporte en Construcciones: Metodologías, niveles de actividad y factores de emisión sacadas del informe “Elaboración de Diagnostico e Inventario de Emisión”; Transporte en Aeropuertos: Metodologías, niveles de actividad y factores de emisión sacadas del estudio “Actualización Memoria de Cálculo de Emisiones Aeropuerto Arturo Merino Benítez” (Algoritmos, 2011)

Tabla 4.5: Enfoque Metodológico: Modelos a usar en cada tipo de fuente emisora, productos esperados y aplicaciones para el inventario de emisiones de la VI Región. Fuente: Inventario de emisiones VI región.

Tipo de Fuente Emisora	Modelo/Metodología a usar	Productos Esperados del Estudio en Emisiones	Aplicaciones de los Resultados
Quema de biomasa		1) Integración base de datos de emisiones EDB en IAIRVIRO inventario 2006 (Georreferenciado y espacialmente distribuido) 2) Inventario de emisiones agregado	• Cruzar la información de los inventarios con los resultados del estudio paralelo: “Estudio diagnostico fuentes de emisión responsables del MP_{10} en Rancagua (modelo de receptor).
Quema Residencial y Comercial de Leña	Modelo Quema Leña		
Quemas Agrícolas	SAIE		
Incendios Forestales	SAIE		
Transporte			

Transporte de Carga	MODEM II	2006 (Emisiones por categoría y por contaminante) 3) Proyección de emisiones 2010 4) Inventario 2006 con medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación (simulación) de medidas y estrategias para reducir emisiones. • Proyección de emisiones y su impacto a los años 2010. • Modelación de dispersión de contaminantes en la VI Región para determinar zonas saturadas. • Modelos de pronóstico de calidad del aire, los cuales se alimentan de emisiones, meteorología y calidad del aire (para usos futuros). • Otros usos: difusión, evaluación de impacto ambiental, etcétera.
Transporte Público			
Vehículos Livianos			
Emisiones Industriales			
Grandes Industrias	Software Decreto 138, SAIE		
Otras Industrias	Programa Cliente SAIE		
Emisiones Biogénicas	GLOBEIS (EPA) SAIE		
Emisiones de Polvo			
Resuspendido por tráfico calles pavimentadas	MODEM II		
Resuspendido por tráfico calles sin pavimentar	SAIE		
Actividades agrícolas			
Construcción			
Otras fuentes de polvo			
Otras Fuentes Menores			
Móviles fuera de ruta, aeropuerto, etcétera	SAIE		

5. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CRITERIO

La atmósfera terrestre es la parte gaseosa de la Tierra, siendo por esto la capa más externa y menos densa del planeta. Está constituida por varios gases que varían en cantidad según la presión a diversas alturas. Esta mezcla de gases que forma la atmósfera recibe genéricamente el nombre de aire. El 75% de masa atmosférica se encuentre en los primeros 11 [km] de altura, desde la superficie del mar. Los principales elementos que la componen son el Oxígeno (20,95%) y el Nitrógeno (78,08%). El resto está formando por Argón (0,934%), Dióxido de Carbono y otras especies en variados estados de agregación que por sus ínfimas cantidades se denominan trazas atmosféricas. Son estas trazas atmosféricas, incluyendo al relativamente abundante Dióxido de Carbono, las que definen las propiedades químicas y radiativas de nuestra atmósfera. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, es esta la fracción de la composición de la atmósfera que se ha visto enorme y rápidamente alterada por las actividades humanas en los últimos dos siglos, teniendo consecuencias sobre la calidad de vida de las personas, los ecosistemas en general y en el sistema climático en su conjunto.

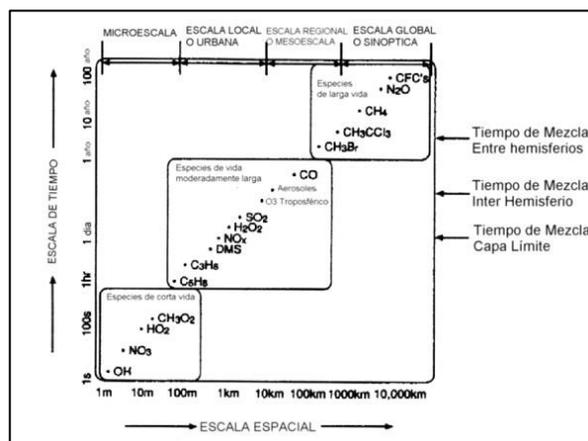


Figura 5.1: Variabilidad espacial y temporal de los constituyentes atmosféricos.
Fuente: Basseur *at al.*, 1999.

La figura 5.1 muestra escalas de tiempo y espacio características para distintas trazas atmosféricas. En general, las trazas cuyas concentraciones varían en el tiempo y el espacio tienen vidas medias cortas; mientras que aquellas de vidas medias largas se mezclan homogéneamente en toda la atmósfera. Esta gama de trazas atmosféricas actúan e interactúan en un sin fin de procesos, desde la formación de nubes hasta la irritación de las vías respiratorias humanas. Para comprender de mejor forma la complejidad de estos procesos, describiremos someramente algunos procesos químicos y físicos relevantes para un subconjunto de trazas típicamente llamados “contaminantes criterios”. Su denominación nace del manejo ambiental de ciudades contaminadas basadas en la identificación de un conjunto de trazas cuyos efectos sobre la salud humana han sido profusamente constatados bajo criterios epidemiológicos y que, por cierto, sustentan, entre otras, la legislación ambiental chilena vigente.

5.1 OZONO

Este componente químico, por medio de la denominada capa de Ozono, es el que evita el dañino impacto de los rayos ultravioleta de tipo B (UV-B) sobre los seres vivos. Se denomina capa de Ozono a la zona de la estratósfera que contiene una concentración relativamente alta de Ozono. Esta capa, que se extiende aproximadamente de los 15 [km] a los 40 [km] de altitud, según la latitud, el recorrido en longitud de los rayos solares a través de la atmósfera será más largo o más corto. En las latitudes más altas, la atmósfera es más espesa que en las zonas tropicales.

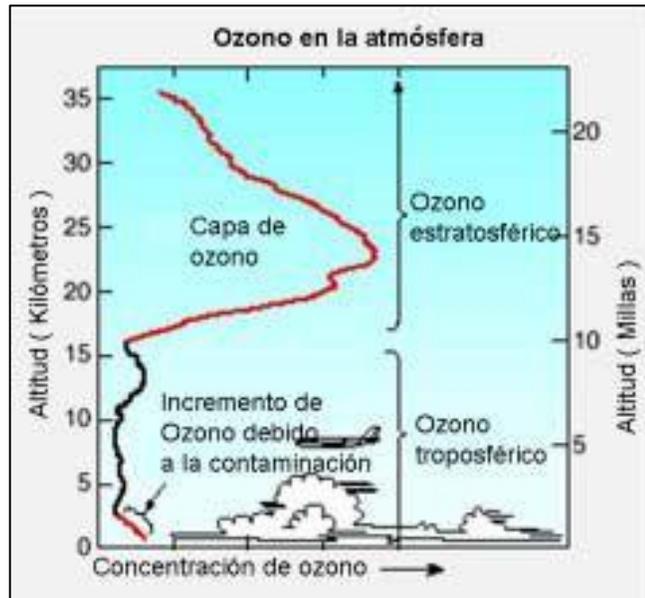
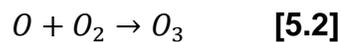
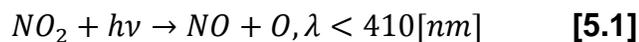


Figura 5.2: Distribución vertical típica de Ozono en la atmósfera. Fuente: <http://www.aemet.es/es/noticias/2004/20040916>.

De acuerdo a la figura 5.2, según la altitud a la que se encuentre, el Ozono se clasifica de 2 formas: el estratosférico y el troposférico. El estratosférico representa el 90% del Ozono atmosférico, mientras que el troposférico el 10%. El Ozono troposférico se produce a partir de la fotólisis del Dióxido de Nitrógeno:



Dada su reactividad química, el Ozono en grandes concentraciones, como las observadas en centros urbanos, resulta ser un agente nocivo para la salud humana y altamente corrosivo de materiales y vegetales.

5.2 DIÓXIDO DE AZUFRE

El Dióxido de Azufre es emitido directamente a la atmósfera o producido a través de la oxidación de otros compuestos de Azufre, por ejemplo Ácido Sulfhídrico, el cual es emitido en procesos en los cuales participan compuestos de Azufre y materia orgánica a altas temperaturas. Algunas actividades industriales que emiten este gas son el refinado de petróleo y la industria textil.

La oxidación del Dióxido de Azufre ocurre en fase gaseosa a través del radical Hidroxilo y en la fase acuosa, principalmente, a través de Ozono y agua oxigenada. La oxidación en fase acuosa del Dióxido de Azufre, en presencia de nubes o niebla, es más efectiva que la oxidación en fase gaseosa. Esta oxidación resulta en Ácido Sulfúrico y aerosoles sulfato. El material particulado generado de esta manera sirve como núcleos de condensación de nubes y también es capaz de reflejar luz solar incidente.

Su tiempo de recambio troposférico se estima a nivel global en el orden de algunos días, por lo tanto, su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional.

5.3 DIÓXIDO DE NITRÓGENO

Casi todos los Óxidos de Nitrógeno emitidos en centros urbanos se producen por la oxidación del Nitrógeno atmosférico presente en las combustiones abiertas a altas temperaturas. El óxido inicial es Monóxido de Nitrógeno, que rápidamente se oxida a Dióxido de Nitrógeno. Otras fuentes de Óxidos de Nitrógeno son las descargas eléctricas, la quema de biomasa y procesos bacterianos en suelos. Análogamente al Dióxido de Azufre, el Dióxido de Nitrógeno es oxidado principalmente en fase gaseosa a través del radical Hidroxilo a Ácido Nítrico. Este también da lugar a aerosoles y núcleos de

condensación. Sin embargo, el principal rol de los Óxidos de Nitrógeno es su carácter de precursor de Ozono. En la tropósfera el Ozono se produce a partir de la fotólisis del Dióxido de Nitrógeno.

El Dióxido de Nitrógeno es químicamente reactivo y tiene efectos nocivos sobre la salud de las personas. Además, en altas concentraciones, como las observadas en centros urbanos, provoca un color rojizo característico de las atmósferas contaminadas por actividades industriales. Al igual que el Dióxido de Azufre, el Dióxido de Nitrógeno es un precursor de sustancias ácidas, cuya deposición ulterior sobre los ecosistemas puede acarrear problemas de acidificación. Su tiempo de recambio troposférico se estima, a nivel global, como del orden de algunos días. Por lo tanto, al igual que el Dióxido de Azufre, su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional.

5.4 MATERIAL PARTICULADO 2,5

El material particulado suspendido en el aire (aerosoles) es una mezcla de diversas sustancias en varios estados de agregación o fases. Los aerosoles, dependiendo de sus características físicas y químicas, pueden ser dañinos para la salud de las personas. Hoy en día, los esfuerzos están centrados en la caracterización y disminución del material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 2,5 [μm] ($\text{MP}_{2,5}$), ya que tiene un tiempo de residencia en la atmósfera más largo, lo que hace que éste pueda transportarse largas distancias, impactando a escala regional.

En gran medida, los aerosoles son responsables de la formación de nubes. De hecho, la condensación del vapor de agua en la atmósfera (nubes) es facilitada por la presencia de solutos o aerosoles, determinando varias de las

propiedades radiativas, cumpliendo un rol central en el balance energético del sistema climático.

Los aerosoles troposféricos tienen diversas fuentes (**ver figura 5.3**). Hay aerosoles que son emitidos directamente a la atmósfera, por ejemplo, polvo levantado por el viento, erupciones de volcanes o chimeneas industriales. También hay aerosoles derivados de transformaciones físicas y químicas que ocurren en la atmósfera. Los mecanismos de remoción de aerosoles son la coagulación, la precipitación y la sedimentación, por lo tanto, el material particulado, dependiendo de su tamaño, puede dispersarse a escalas local o regional.

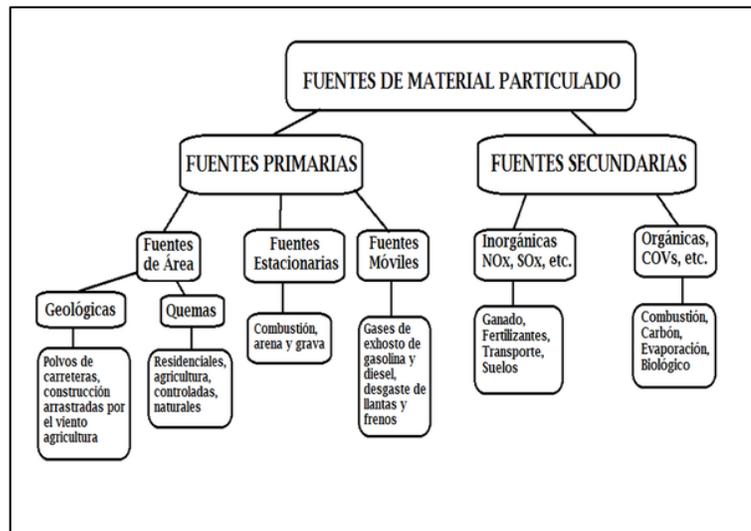


Figura 5.3: Fuentes primarias y secundarias de material particulado. Fuente: USACH.

Dependiendo de su origen, el material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 2,5 [µm] se puede clasificar en 2 tipos: primario y secundario. El primario proviene principalmente de la combustión incompleta de los combustibles de origen fósiles, mientras que el de tipo secundario proviene de la fotoquímica atmosférica.

Cabe señalar que tanto el Amoníaco como los COV's aún no son considerados en Chile contaminantes atmosféricos criterio, pero aun así los consideraremos en el desarrollo de este capítulo, ya que de esta manera lograremos comprender de mejor forma los resultados arrojados por el monitoreo con muestreadores pasivos, y la comparación entre éstos y los simulados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.

5.5 AMONÍACO

Se encuentra como un gas con un olor acre característico. El Amoníaco contribuye de manera significativa a las necesidades nutricionales de los organismos terrestres por los que actúan como un precursor a los productos alimenticios y fertilizantes. El Amoníaco, ya sea directa o indirectamente, es también un elemento fundamental para la síntesis de muchos farmacéuticos. Aunque en amplio uso, el Amoníaco es a la vez cáustico y peligroso.

5.6 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Una categoría de sustancias contaminantes de importancia creciente en las últimas décadas es la de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's). Los COV's comprenden miles de especies químicas que son tóxicas para la salud o bien precursoras de oxidantes fotoquímicos responsables del smog, que contribuyen al efecto invernadero y/o a la degradación de la capa de Ozono estratosférico. No existe una definición internacionalmente adoptada para este tipo de compuestos, la mayoría de las acepciones se basan en descripciones estrictamente químicas. La más aceptada es la de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas del año 1991, que textualmente los define como *“Compuestos Orgánicos Volátiles, distintos del Metano, de naturaleza antropogénica capaces de producir oxidantes fotoquímicos en presencia de luz*

solar por reacción con Óxidos de Nitrógeno". Esta reacción química implica una eliminación del contaminante primario por transformación del mismo en compuestos a veces de mayor carácter tóxico (contaminación secundaria).

Comúnmente se tiene dos grupos importantes de COV's en las emisiones industriales: los Hidrocarburos (incluyendo a los Oxigenados) y los Hidrocarburos Halogenados. Los COV's incluyen a muchos tipos de solventes, desgrasantes, limpiadores, lubricantes, y combustibles líquidos.

Las principales fuentes de COV's están relacionadas directa o indirectamente con el petróleo y sus derivados: vapores de automóviles por combustión incompleta (aromáticos, olefinas y parafinas), industrias de pinturas, tintas, lacas y esmaltes (Alcanos y Cicloalcanos), vapores de gasolinas emitidos desde los tanques de almacenamiento, disolventes empleados en pinturas y operaciones de desengrasado y limpieza (Hexano, Ciclohexano y aromáticos derivados del Tolueno y Xileno), adhesivos (Metil-Etil Cetona, derivados tipo Nafta, Tricloetano), aerosoles, industrias de plásticos (compuestos clorados).

5.7 NORMAS PRIMARIAS DE CALIDAD DEL AIRE VIGENTES EN CHILE

Para poder elaborar políticas públicas medio ambientales de calidad del aire, es necesario conocer los límites de concentración de los distintos contaminantes atmosféricos criterio. Es por esto que se ha elaborado la siguiente tabla resumen en dónde se estipula cuándo es sobrepasada una norma primaria de calidad de aire en Chile en función de su concentración anual, 24 horas, 8 horas, 1 hora, dependiendo del contaminante atmosférico criterio:

Tabla 5.1: Tabla resumen de la norma primaria de calidad del aire vigente en Chile para cada contaminante atmosférico criterio. Fuente: Elaboración propia.

Contaminante Atmosférico Criterio	Concentración Anual [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración de 24 horas [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración de 8 horas [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración de 1 hora [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Ozono	-	-	120	-
Dióxido de Azufre	80	250	-	-
Dióxido de Nitrógeno	100	-	-	400
Material Particulado 2,5	20	50	-	-
Amoníaco	No Posee Norma Primaria de Calidad del Aire			
COV's	No Posee Norma Primaria de Calidad del Aire			

Concentración de 1 hora: Promedio aritmético de los valores de concentración del contaminante criterio medidos en 1 hora. **Concentración de 8 horas:** Promedio aritmético de los valores de concentración de 1 hora del contaminante criterio correspondientes a 8 horas sucesivas. **Concentración de 24 horas:** Promedio aritmético de los valores de concentración de 1 hora del contaminante criterio correspondientes a un bloque de 24 horas sucesivas, contadas desde las cero horas de cada día. **Concentración anual:** Promedio aritmético de los valores de concentración trimestral del contaminante criterio correspondientes a un 1 año calendario.

Cabe señalar que para fijar los niveles de concentración que originan situaciones de emergencia ambiental se consideró lo señalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en relación a los efectos agudos sustanciales que se producen sobre la población cuando ésta realiza ejercicios con exposición a un determinado nivel de concentración, particularmente en individuos susceptibles.

A continuación, una tabla resumen de los efectos sobre la salud de los distintos contaminantes atmosféricos criterio:

Tabla 5.2: Tabla resumen de los efectos sobre la salud de los distintos contaminantes atmosféricos criterio. Fuente: CMMCh.

Contaminante Atmosférico Criterio	Efectos en la Salud
Ozono	Agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, disminución de función pulmonar e incremento de síntomas respiratorios, incremento de la susceptibilidad a infecciones respiratorias y muerte prematura
Dióxido de Azufre	Agravamiento de asma e incremento de síntomas respiratorios. Contribuye a la formación de partículas que tienen impacto en salud
Óxidos de Nitrógeno	Agravamiento de enfermedades respiratorias e incremento de la susceptibilidad a las infecciones respiratorias. Contribuye a la formación de Ozono y de partículas que tienen impacto en la salud
Material Particulado	Agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, disminución de función pulmonar, incremento de síntomas respiratorios, y muerte prematura
Amoníaco	En concentraciones elevadas irrita la garganta, inflama los pulmones, daña las vías respiratorias y los ojos

6. TUBOS PASIVOS

6.1 TUBOS PASIVOS DE OZONO, DIÓXIDO DE AZUFRE, DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y AMONÍACO

Los tubos pasivos de O_3 , SO_2 , NO_2 y NH_3 son tubos plásticos que contienen en su interior un *muestreador sensible* (ver figura 6.1). El *muestreador sensible* consiste en un filtro impregnado con un adsorbente en particular (señalado con el nº 1 en la figura 6.2), un anillo (señalado con el nº 2 en la figura 6.2) y una malla de acero inoxidable (señalado con el nº 3 en la figura 6.2) (ver figura 6.2). El filtro impregnado adsorbe el contaminante atmosférico que se desea muestrear, el anillo sirve de unión entre el filtro y la malla actúa como una protección mecánica por donde difunde el contaminante atmosférico.



Figura 6.1: A la izquierda, una fotografía de los tubos pasivos de O_3 , SO_2 , NO_2 y NH_3 respectivamente. A la derecha, una fotografía de los *muestreadores sensibles* de O_3 , SO_2 , NO_2 y NH_3 respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

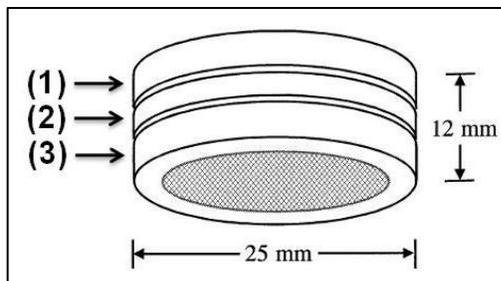


Figura 6.2: Partes y dimensiones de un *muestreador sensible*. Fuente: IVL.

El filtro de los tubos pasivos de O_3 está impregnado de Ión Nitrito (NO_2^-), el de los de SO_2 de Hidróxido de Sodio ($NaOH$), el de los de NO_2 de una mezcla de Yoduro (I^-), Arsenito (AsO_3^{3-}) y de Etilenglicol ($C_2H_6O_2$), y los de NH_3 de Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) [3].

El principio de muestreo pasivo está definido por la primera ley de Fick. La primera ley de Fick indica que para que tenga lugar un fenómeno de difusión, la distribución espacial de moléculas no debe ser homogénea, o sea, debe existir una diferencia, o gradiente de concentración entre dos puntos del medio (J y J' en la figura 6.3). Supongamos que su concentración varía con la posición a lo largo del eje x . Llamemos J a la densidad de corriente de partículas, es decir, al número efectivo de partículas que atraviesan por unidad de tiempo, un área unitaria perpendicular a la dirección en la que tiene lugar la difusión.

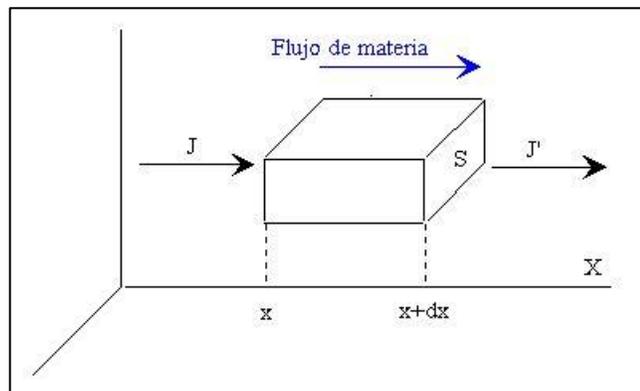


Figura 6.3: Esquema representativo de la primera ley de Fick. Fuente: <http://www.sc.ehu.es/>.

La primera ley de Fick afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración:

$$J = -D \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right) \quad [6.1]$$

La constante de proporcionalidad D se denomina coeficiente de difusión y es característico tanto del soluto como del medio en el que se disuelve. Por lo tanto, la cantidad de contaminante absorbido es directamente proporcional a su concentración en el ambiente, al tiempo de exposición, a su coeficiente de difusión en el aire y a la sección transversal del tubo ^[4].

Luego de un cierto tiempo de exposición, se extrae el contaminante atmosférico y se determina su concentración por cromatografía iónica.

Los análisis químicos de los tubos pasivos se realizaron en el IVL. Estos análisis consideran la implementación de medidas para el control de la calidad de las mediciones, tales como: respetar las exigencias de temperaturas de almacenamiento dadas por el fabricante y el empleo de tubos pasivos blancos en transporte y en terreno, de modo de verificar su sellado.

Según el IVL, el tiempo normal de exposición de los tubos pasivos es de 1 mes. En la tabla 6.1, se muestran los rangos de detección de los tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂ y NH₃ para 1 mes de exposición:

Tabla 6.1: Límites de detección para un tiempo de exposición de 1 mes prescritos en los protocolos de trabajo del IVL para cada contaminante atmosférico. Fuente: IVL.

Contaminante Atmosférico	Límite Inferior de Detección [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Límite Superior de Detección [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Ozono	1,0	100,0
Dióxido de Azufre	0,1	100,0
Dióxido de Nitrógeno	0,1	100,0
Amoníaco	0,2	30,0

Cada uno de los tubos pasivos viene al interior de una bolsa de plástico sellada (**ver figura 6.5**), junto con una hoja de protocolo (**ver figura 6.4**), en la cual el usuario debe completar las siguientes informaciones:

- Tipo de tubo pasivo (ya sea de Ozono, Dióxido de Azufre, etcétera).
- Fecha y hora de instalación y desinstalación (con el siguiente formato: AA/MM/DD, hh:mm).
- Temperatura promedio durante el muestreo.
- Lugar de instalación (ya sea “indoor” o “outdoor”).
- Elevación del punto en donde se instaló.

Sampling protocol, diffusive samplers IVL 2013-06-25

Contract 2974 Centro Mario Molina Chile
Delivery 87482 Year-month 2013-07 Elevation _____ m
Instructions
Station 34689 Write station name, please

Sample ID	Type	Start (date hour) yyyy-mm-dd hh:mm	Stop (date hour) yyyy-mm-dd hh:mm	Temp	In/Out
691385	NOX	_____	_____	_____	_____
	Remarks	_____			
691385	NOX	_____	_____	_____	_____
	Remarks	_____			

Figura 6.4: Fotografía de la hoja de protocolo de los tubos pasivos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.5: Fotografía de cómo son recibidos los tubos pasivos del IVL. Fuente: Elaboración propia.

Para proteger los tubos pasivos de O_3 , SO_2 , NO_2 y NH_3 de la lluvia, se colocan al interior de un recipiente o de un vaso plástico desechable (ver figura 6.6 y 6.7), dependiendo de la cantidad de tubos pasivos que se instalen en el punto de muestreo.



Figura 6.6: Fotografía de 4 tubos pasivos de O_3 , SO_2 , NO_2 y NH_3 colocados al interior de un recipiente. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.7: Fotografía de 1 tubo pasivo de O_3 colocado al interior de un vaso plástico desechable. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.8: Fotografía de la perspectiva de 4 tubos pasivos (encerrados en un círculo de color amarillo) colocados al interior de un recipiente, instalados a 3 [m] de altura aproximadamente en un poste de luz en el pueblo de Coya, VI región. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.9: Fotografía de la perspectiva de 1 tubo pasivo de O₃ (encerrado en un círculo de color amarillo) colocado al interior de un vaso plástico desechable, instalado a 3 [m] de altura en un árbol en el pueblo de Melipilla, RM. Fuente: Elaboración propia.

6.2 TUBOS PASIVOS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Los tubo pasivos de COV's son tubos de acero inoxidable (**ver figura 6.10**) que contienen 300 [mg] de TENAX, material que consiste en un polímero poroso de resina basado en Óxido 2,6-Difenil-P-Fenileno, el cual es específico para adsorber COV's de cadena C₆-C₉ (Benceno, Tolueno, Octano, Acetato de Butilo, Etilbenceno, O-M-P-Xileno y el Nonano) ^[5].

Al igual que los tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂ y NH₃, el fundamento del muestreo de los tubos pasivos de COV's está basado en la primera ley de Fick.

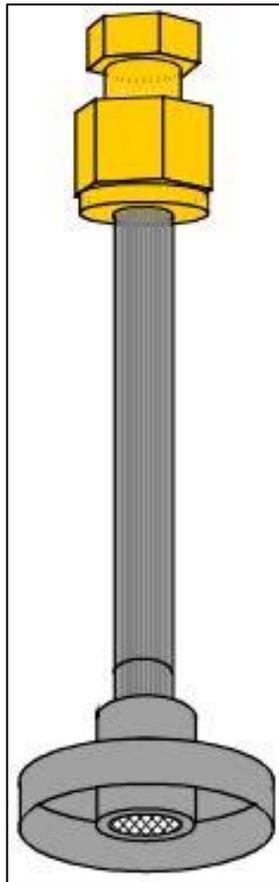


Figura 6.10: Tubo pasivo de COV's dispuesto para muestrear. Fuente: IVL.

En la figura 6.11 se muestra un tubo pasivo de COV's tal cual es recibido del IVL. En la parte central de la figura 6.11, el tubo pasivo de COV's envuelto con papel de aluminio y al costado superior derecho de la figura 6.11, encerrado en círculo de color negro, el plato de difusión.



**Figura 6.11: Fotografía de un tubo pasivo de COV's tal cual es recibido del IVL.
Fuente: Elaboración propia.**

Para comenzar a muestrear, se desenvuelve el tubo pasivo de COV's, se reemplaza el cabezal tipo tuerca (encerrado con un círculo de color amarillo en la figura 6.12) por el plato de difusión (encerrado con un círculo de color negro en la figura 6.12), y luego se enrolla la parte superior del tubo pasivo de COV's con un trozo de alambre para poder ser colgado a cierta altura (ojalá sobre los 2 [m] de altura) en el sitio de muestreo.

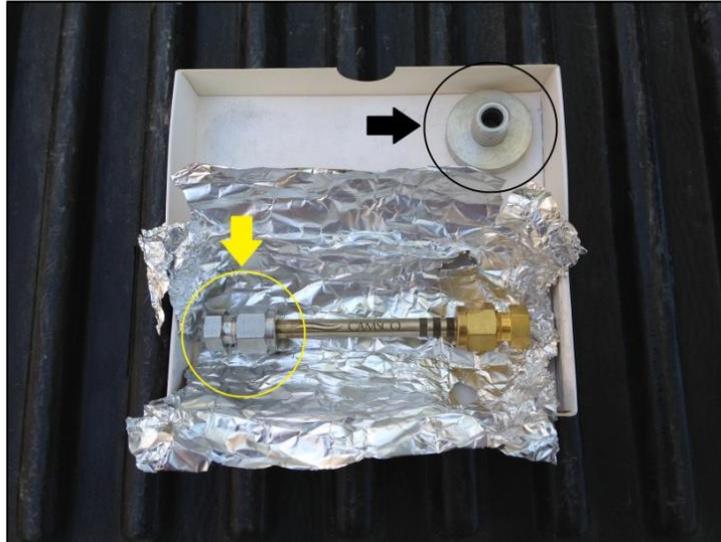


Figura 6.12: Fotografía de un tubo pasivo de COV's desmenuado. Fuente: Elaboración propia.

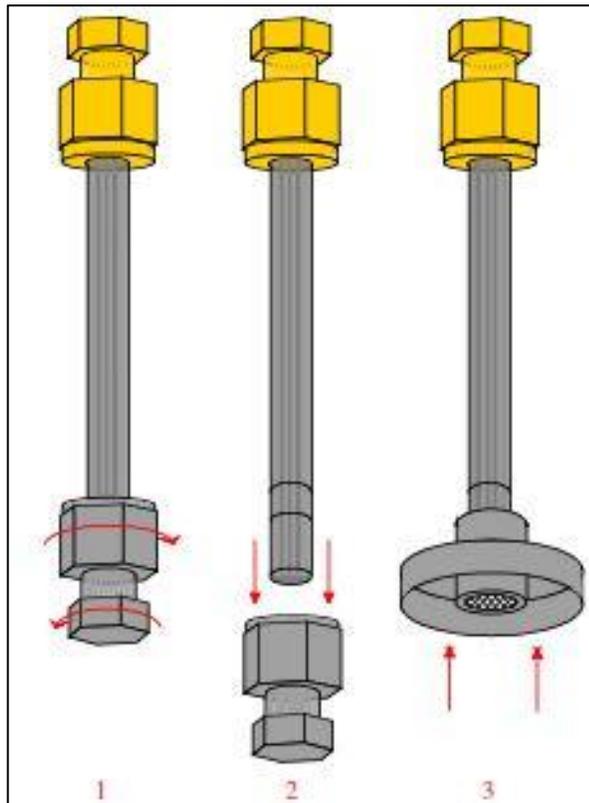


Figura 6.13: Esquema del proceso de armado de un tubo pasivo de COV's. Fuente: IVL.

Según el IVL, el tiempo normal de exposición de los tubos pasivos de COV's impregnados con TENAX es de 7 días. En la tabla 6.2, se muestran los rangos de detección para cada contaminante atmosférico de los tubos pasivos de COV's impregnados con TENAX para un tiempo de exposición de 7 días:

Tabla 6.2: Los rangos de detección para cada contaminante atmosférico de los tubos pasivos de COV's impregnados con TENAX para un tiempo de exposición de 7 días. Fuente: IVL.

Contaminante Atmosférico	Límite Inferior de Detección [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Límite Superior de Detección [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Benceno	0,18	100,00
Tolueno	0,20	90,00
N-Octano	0,13	100,00
Etil-Benceno	0,09	70,00
M+P-Xileno	0,32	150,00
O-Xileno	0,12	70,00
N-Nonano	0,12	120,00

Las muestras recolectadas por los tubos pasivos de COV's fueron extraídas mediante desorción térmica, para luego ser analizadas con un sistema compuesto por un cromatógrafo de gases y un espectrómetro de masas.

Para proteger los tubos pasivos de COV's de la lluvia, se colocan al interior de un vaso plástico desechable (**ver figura 6.14**).



Figura 6.14: Fotografía de 1 tubo pasivo de COV's colocado al interior de un vaso plástico desechable. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.15: Fotografía de la perspectiva de 1 tubo pasivo de COV's (encerrado en un círculo de color amarillo) colocado al interior de un vaso plástico desechable, instalado a 3 [m] de altura en un poste de luz en el pueblo de Coya, VI región. Fuente: Elaboración propia.

7. RED DE MONITOREO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

7.1 MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

Se monitoreó de forma continua en 3 sitios de la MZC (**ver figura 7.1**). En estos 3 sitios se monitoreó la composición química de la fracción no refractante del $MP_{2,5}$ (Aerosol Orgánico, Nitrato, Sulfato, Cloruro y Amonio) y Carbono Elemental. Estos sitios fueron: *USACH* (Latitud: 33°27'1" [S]; Longitud: 70°40'51" [O]), *Las Condes* (Latitud: 33°22'32" [S]; Longitud: 70°31'24" [O]) y *Melipilla* (Latitud: 33°47'44" [S]; Longitud: 71°14'10" [O]).



Figura 7.1: Imagen satelital de los 3 sitios en donde se monitoreó de forma continua en la MZC. Fuente: Google Earth.

Para la caracterización química de la fracción no refractante del $MP_{2,5}$ se utilizó un Monitor de Especiación Química de Aerosoles (**ver imagen 7.2**). Este equipo proporciona una lectura de la concentración de Aerosol Orgánico (Org), Nitrato (NO_3), Sulfato (SO_4), Cloruro (Cl) y Amonio (NH_4), con una resolución temporal de 30 minutos. El instrumento consta de una toma de muestras por donde ingresan las partículas, 3 cámaras de vacío y 1 espectrómetro de masas de analizador de gas residual. Utilizando un sistema aerodinámico de lentes, las partículas son focalizadas en un haz, el cual se transmite a través de las 3 cámaras de vacío. En la tercera cámara de vacío, el haz de partículas es enfocado a un *horno de tungsteno caliente (hot tungsten oven)*, en donde las partículas son vaporizadas (*flash-vaporized*). Luego el vapor es ionizado con un ionizador de impacto de electrones, para luego ser caracterizado químicamente por un espectrómetro de masas cuadrupolo.

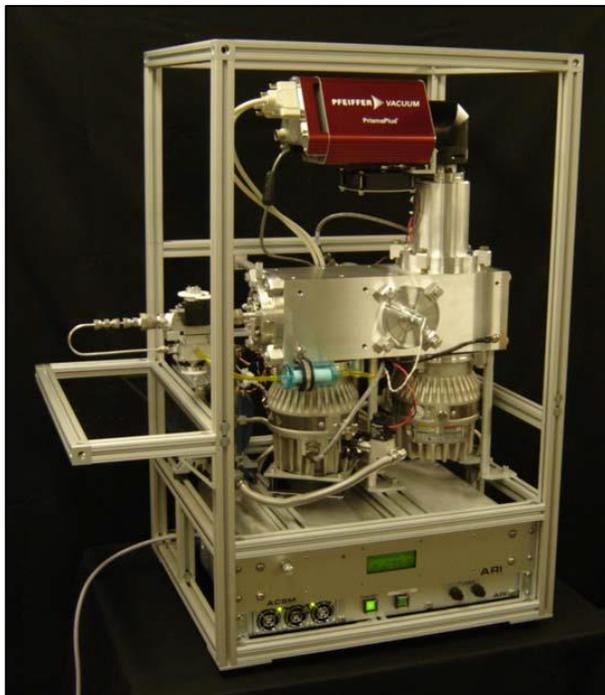


Figura 7.2: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles. Fuente: Aerodyne Research Inc.

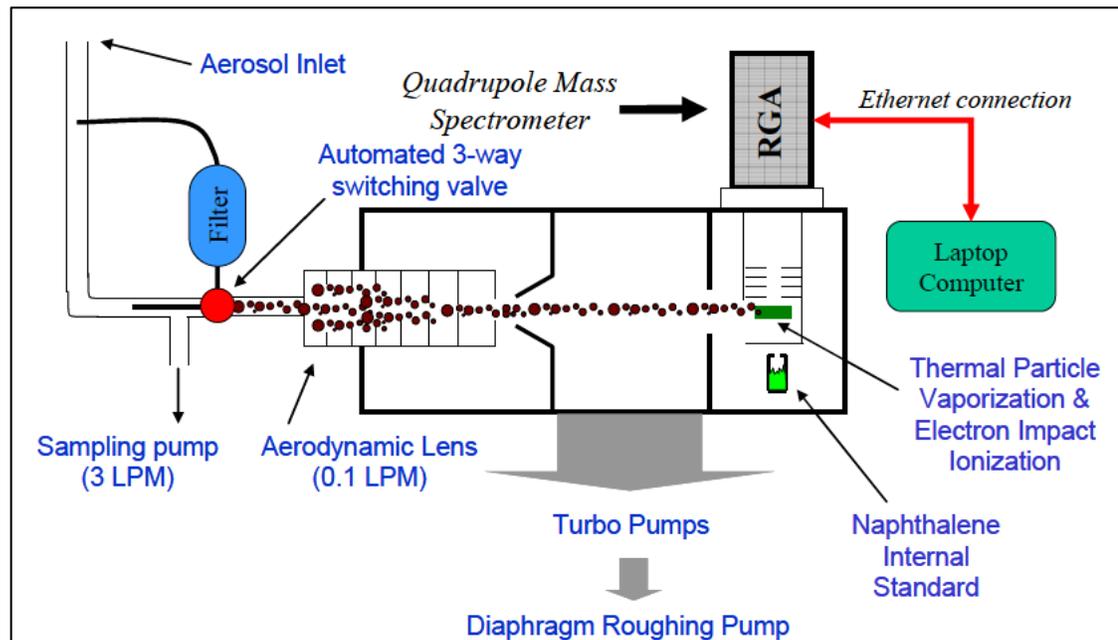


Figura 7.3: Esquema del funcionamiento del Monitor de Especiación Química de Aerosoles. Fuente: CMMCh.

Para la medición de Carbono Elemental se utilizó un equipo SIMCA. El SIMCA proporciona una lectura de la concentración de Carbono Elemental en tiempo real, utilizando un método de absorción óptica. Dicho método óptico es una medida de la atenuación de un haz de luz transmitido a través del filtro recolector de la muestra, producto de la absorción de las partículas que contienen carbón. Esta atenuación es directamente proporcional a la concentración de Carbono Elemental.

Se utilizó el Software EPA PMF 5.0 (Positive Matrix Factorization) para calcular las concentraciones de Aerosol Orgánico Oxigenado con Baja Volatilidad (LV-OOA), de Aerosol Orgánico Primario proveniente de la Combustión de Biomásas (BBOA), de Aerosol Orgánico Oxigenado Semi Volátil (SV-OOA) y de Aerosol Orgánico Hidrocarburado (HOA), tomando como variable de entrada las concentraciones de Aerosol Orgánico (Org) medido por el Monitor de Especiación Química de Aerosoles.

El PMF es un Software libre desarrollado por la US Environmental Protection Agency (EPA), el cual utiliza una técnica estadística que trabaja sobre datos multivariantes, realizándole un cambio de base algebraico para disminuir el número de dimensiones del problema. Este cambio de base se interpreta como una clasificación de los datos en distintos grupos, a los cuales se les denomina como factores.

Este Software presenta dos grandes ventajas: 1) la inclusión de la incerteza de las mediciones de datos en el modelo, y 2) agrega una condición de no negatividad en los factores, la cual es una restricción.

7.2 MONITOREO PASIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

Tal como se puede apreciar en la figura 7.4, se diseñó una grilla espacial sobre la MZC, la cual la dividió su área en 18 cuadrantes, cada uno con un área de 50 x 50 [km]. En cada uno de estos cuadrantes se instalaron tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂, NH₃ y COV's.

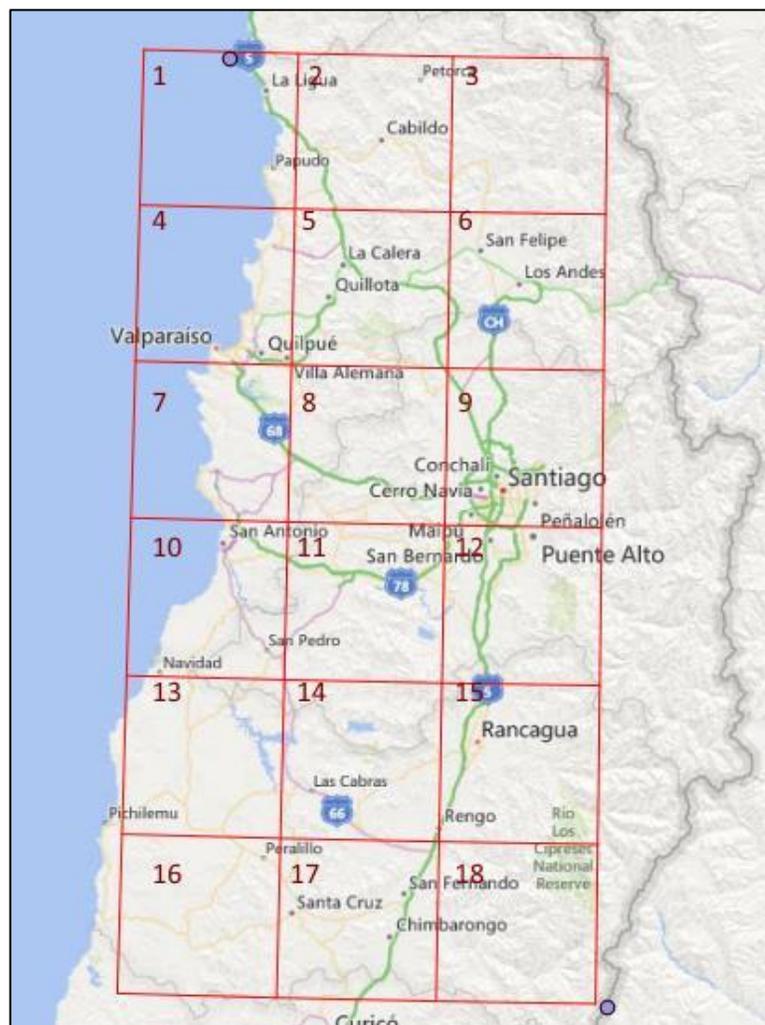


Figura 7.4: Grilla espacial diseñada sobre la MZC para la distribución del monitoreo pasivo. Fuente: Programa QGIS.

Los criterios utilizados para determinar la cantidad y el tipo de tubos pasivos, y seleccionar su ubicación geográfica dentro del cuadrante fueron los siguientes:

1. Se consideraron las recomendaciones del SMHI, las cuales fueron: a) generar gradientes a través de las cuencas hacia a la ciudad de Santiago (**ver figura 7.5**), y b) monitorear el fondo urbano de las principales ciudades de la MZC.

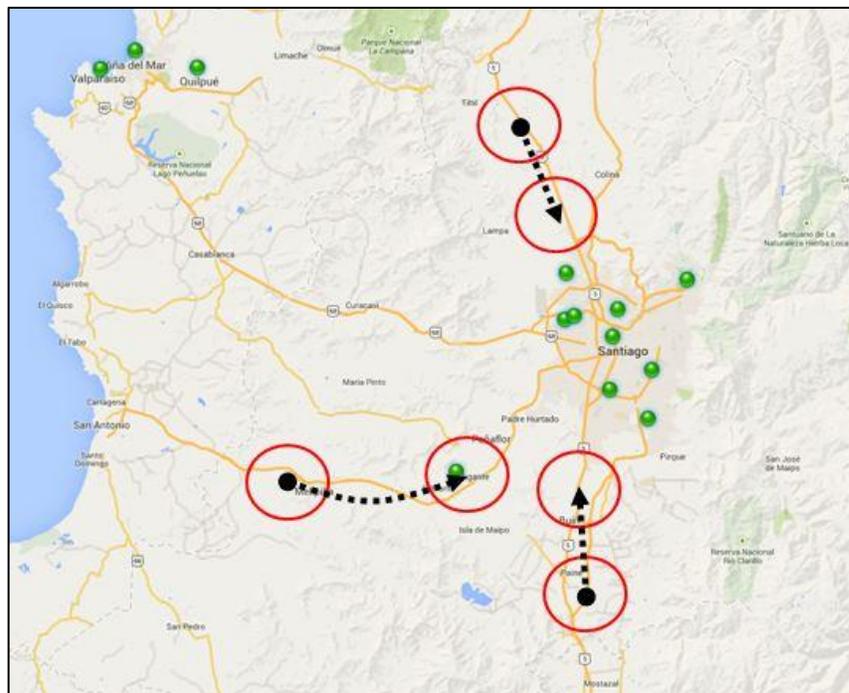


Figura 7.5: Gradientes espaciales sobre las cuencas geográficas en dirección de la ciudad de Santiago. Fuente: SMHI.

2. Conocida la ubicación geográfica de las principales fuentes emisoras de cada región que componen la MZC, se deseaba cuantificar su aporte a la concentración de $MP_{2,5}$ y sus precursores a la RM.

Considerando los criterios expuestos anteriormente, los tubos pasivos instalados por cuadrante fueron los siguientes:

Tabla 7.1: Cantidad y tipo de tubo pasivo instalado por cuadrante de la grilla espacial diseñada sobre la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Cuadrante	Sitio	Contaminante Atmosférico Monitoreado				
		O ₃	NH ₃	NO ₂	SO ₂	COV's
4	Puchuncaví	✓	x	x	✓	x
	Valparaíso	✓	x	x	x	x
5	Tiltil	✓	x	✓	✓	✓
	La Calera	✓	x	x	x	x
6	Los Andes I	✓	x	x	x	x
	Los Andes II	✓	x	x	x	x
7	Casablanca I	✓	x	✓	x	✓
	Casablanca II	✓	x	x	x	x
8	Curacaví I	✓	x	x	x	x
	Curacaví II	✓	x	x	x	x
9	Lampa I	✓	x	x	x	x
	Lampa II	✓	✓	x	x	x
	USACH	✓	x	x	x	x
10	San Antonio	✓	x	x	x	x
	Santo Domingo	✓	x	x	x	x
11	Melipilla I	✓	✓	✓	✓	✓
	Melipilla II	✓	x	x	x	x
	Talagante	✓	x	x	x	✓
12	Paine	✓	x	x	✓	x
	Buín	✓	x	x	x	x
15	Coya	✓	✓	✓	✓	✓
	Machalí	✓	x	x	x	x
Total		22	3	4	5	5

Observación: El símbolo ✓ indica que se instaló 1 tubo pasivo del contaminante atmosférico en estudio. El símbolo x indica que no se instaló ningún tubo pasivo del contaminante en cuestión en ese cuadrante.

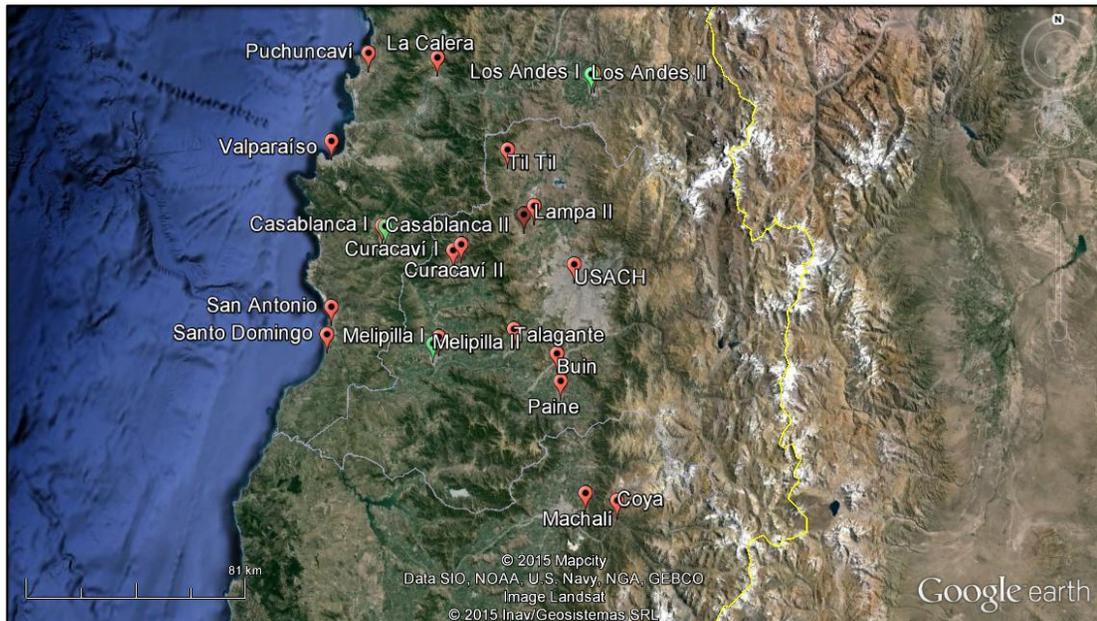


Figura 7.6: Mapa de los sitios en donde se instaló los tubos pasivos en la MZC.
Fuente: Google Earth.

Observación: Los íconos de los sitios *Los Andes II*, *Casablanca II* y *Melipilla II* son de color verde turquesa para diferenciarlo de su par urbano (*Los Andes I*, *Casablanca I* y *Melipilla I* respectivamente), ya que, desde la perspectiva en que se guardó la imagen satelital, pareciese que se sólo se monitoreó con muestreadores pasivos en un solo sitio.

En la tabla 7.2 se muestra la fecha de monitoreo y el tiempo de exposición de cada tubo pasivo para cada sitio de la figura 7.6:

Tabla 7.2: Fecha de monitoreo y tiempo de exposición de cada tipo de tubo pasivo instalado en cada sitio de la figura n° 7.6. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Fecha de Monitoreo								Tiempo de Exposición [días]	
	O ₃ /NH ₃ /NO ₂ /SO ₂				COV's				O ₃ /NH ₃ /NO ₂ /SO ₂	COV's
	Inicio		Termino		Inicio		Termino			
	Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora		
Puchuncaví	12/05/15	15:13	12/06/15	12:44	-				30,90	-
Tilitil	12/05/15	17:30	12/06/15	14:56	12/05/15	17:30	20/05/15	10:57	30,89	7,73
La Calera	12/05/15	14:05	12/06/15	13:51	-				30,99	-
USACH	13/05/15	16:16	17/06/15	17:09	-				35,04	-
Lampa I	12/05/15	18:38	12/06/15	15:46	-				30,88	-
Lampa II	12/05/15	19:03	12/06/15	16:06	-				30,88	-
Los Andes I	12/05/15	11:50	12/06/15	10:28	-				30,94	-
Los Andes II	12/05/15	12:22	12/06/15	10:48	-				30,93	-
Valparaiso	14/05/15	13:50	16/06/15	12:53	-				32,96	-
Casablanca I	14/05/15	15:46	16/06/15	14:10	14/05/15	15:46	22/05/15	13:45	32,93	7,91
Casablanca II	14/05/15	16:31	16/06/15	13:50	-				32,89	-
Coya	13/05/15	12:27	15/06/15	11:47	13/05/15	12:27	20/05/15	13:31	32,97	7,04
Machalí	13/05/15	11:22	15/06/15	12:20	-				33,04	-
Paine	16/05/15	12:38	15/06/15	13:37	-				30,04	-
Buín	16/05/15	13:23	15/06/15	14:08	-				30,03	-
Santo Domingo	15/05/15	14:11	17/06/15	13:39	-				32,98	-
Curacaví I	14/05/15	18:15	16/06/15	15:00	-				32,86	-
Curacaví II	14/05/15	17:30	16/06/15	15:15	-				32,91	-
San Antonio	15/05/15	13:30	17/06/15	12:44	-				32,97	-
Melipilla I	15/05/15	15:23	17/06/15	14:42	15/05/15	15:23	22/05/15	11:56	32,97	6,85
Melipilla II	15/05/15	16:05	17/06/15	15:25	-				32,97	-
Talagante	15/05/15	17:00	17/06/15	16:05	15/05/15	17:00	22/05/15	14:36	32,96	6,90

Tal como se puede observar en la tabla 7.2, el tiempo de exposición de los tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂, y NH₃ es distinto al de los COV's, ya que, tal como se expuso en el capítulo VI: "Tubos Pasivos", el adsorbente con que está impregnado el filtro del *muestreador sensible* es distinto para cada tipo de muestreador pasivo.

La intención era que el tiempo de exposición de los tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂, y NH₃ fuese de 1 mes. Para ello se utilizaron los datos en línea de 4 estaciones del SINCA representativas de la meteorología (velocidad y dirección del viento) de la MZC (**ver figura 7.7**), entre los meses de junio y agosto del año 2014, para determinar las concentraciones promedio de los contaminantes atmosféricos, y así, en función de los rangos de detección promedio (ver

capítulo VI: “Tubos Pasivos”), determinar el tiempo de exposición de los tubos pasivos de O_3 , SO_2 , NO_2 , y NH_3 .

El SINCA no monitorea NH_3 , por lo que se decidió que su tiempo de exposición fuese exactamente de 1 mes, tal como lo recomienda el IVL (ver capítulo VI: “Tubos Pasivos”).

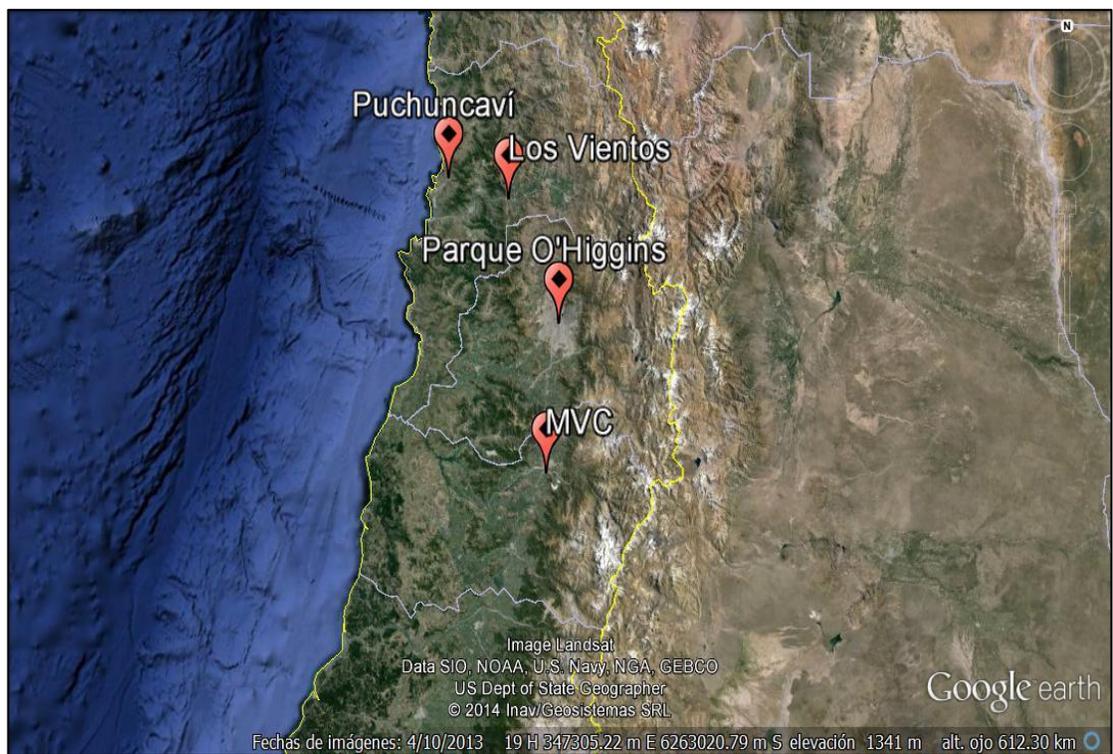


Figura 7.7: Estaciones seleccionadas del SINCA para determinar el tiempo de exposición de los tubos pasivos instalados en la MZC. Fuente: Google Earth.

Tabla 7.3: Promedio mensual de concentración de 24 horas de O₃, NO₂ y SO₂ durante los meses de junio, julio y agosto del año 2014. Fuente: Elaboración propia.

Estación SINCA	Promedio Mes de Junio 2014			Promedio Mes de Julio 2014			Promedio Mes de Agosto 2014		
	O ₃ [ppb]	NO ₂ [ppb]	SO ₂ [ppb]	O ₃ [ppb]	NO ₂ [ppb]	SO ₂ [ppb]	O ₃ [ppb]	NO ₂ [ppb]	SO ₂ [ppb]
Puchuncaví	17,50	10,22	7,53	17,12	8,85	7,61	21,70	7,27	6,53
Los Vientos	21,96	-	8,48	22,75	-	3,60	21,20	-	6,39
Parque O'Higgins	18,91	14,46	1,09	21,55	11,74	1,12	23,10	10,87	1,14
Minera Valle Central (MVC)	25,60	6,63	16,15	25,59	0,48	14,49	15,17	2,77	3,72

Tabla 7.4: Tiempo de exposición de los tubos pasivos de O₃, NO₂ y SO₂ durante los meses de junio, julio y agosto del año 2014. Fuente: Elaboración propia.

Estación SINCA	Tiempo de Exposición Mes de Junio 2014			Tiempo de Exposición Mes de Julio 2014			Tiempo de Exposición Mes de Agosto 2014		
	O ₃ [mes]	NO ₂ [mes]	SO ₂ [mes]	O ₃ [mes]	NO ₂ [mes]	SO ₂ [mes]	O ₃ [mes]	NO ₂ [mes]	SO ₂ [mes]
Puchuncaví	1,40	2,37	2,25	1,48	2,83	2,30	1,13	3,33	2,60
Los Vientos	1,11	-	2,00	1,11	-	4,86	1,15	-	2,66
Parque O'Higgins	1,29	1,78	15,60	1,17	2,13	15,64	1,06	2,23	14,94
Minera Valle Central (MVC)	1,00	3,65	1,05	1,00	51,78	1,21	1,61	8,76	4,56

Tal como se puede observar en la tabla 7.4, el tiempo de exposición de los tubos pasivos de O₃, NO₂ y SO₂, puede ser de 30 días, o más, en ciertos sectores, si es necesario.

Además, tal como se muestra en la figura 7.8, se instalaron, de forma simultánea, tubos pasivos de O₃, SO₂, NO₂, y NH₃ en 4 sitios de la MZC con distinta altura, para generar un gradiente vertical de precursores de MP_{2,5}. La finalidad de este gradiente es engrosar la modelación, utilizándolo en los cortes verticales de la iteración.

Tabla 7.5: Altura y coordenadas geográficas de los 4 sitios en donde se monitoreó con muestreadores pasivos para la generación de un gradiente vertical de precursores de MP_{2,5}. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Altura [m.s.n.m.]	Coordenadas Geográficas	
		Latitud [S]	Longitud [O]
USACH	520	33°27'1"	70°40'51"
La Reina	825	33°27'8.99"	70°31'9.49"
Cerro San Cristóbal	845	33°25'27.16"	70°37'58.79"
La Parva	2700	33°19'58.93"	70°17'21.21"

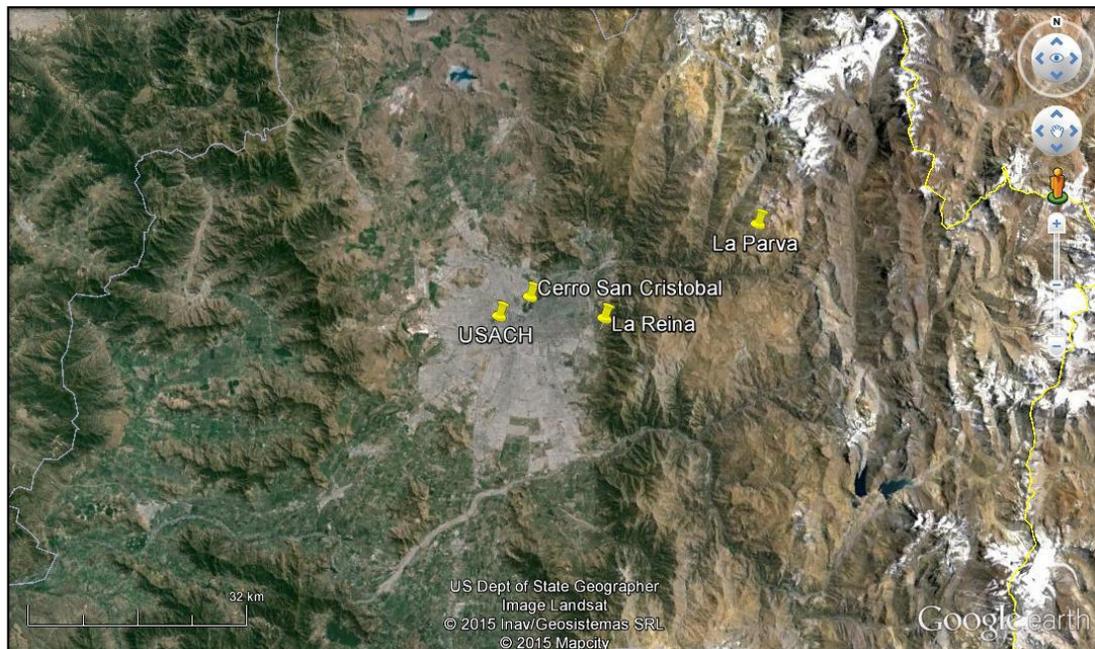


Figura 7.8: Sitios en donde se monitoreó con muestreadores pasivos para la generación de un gradiente vertical de precursores de MP_{2,5}. Fuente: Google Earth.

8. RESULTADOS MONITOREO PASIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

8.1 DIÓXIDO DE AZUFRE

Tabla 8.1: Concentración de SO₂ [µg/m³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de SO ₂ [µg/m ³] Monitoreado
Puchuncaví	35,0
Tiltil	0,9
Coya	6,8
Paine	0,8
Melipilla I	0,4

Considerando que la dirección predominante del viento cerca de la costa marítima es de oeste a este, el sitio *Puchuncaví* recibe emisiones primarias y secundarias de Dióxido de Azufre provenientes de la Central Termoeléctrica AES Gener y del Terminal ENAP respectivamente (**ver figura 8.1**), es por ello que posee la concentración más alta de la tabla 8.1 (35,0 [µg/m³]), casi 30 veces mayor a lo monitoreado en los otros sitios. La Central Termoeléctrica AES Gener emite, producto de la combustión de carbón en sus cuatro unidades, Ácido Sulfhídrico, el cual, dado el alto porcentaje de humedad existente en las proximidades de la costa marítima, se oxida, convirtiéndose en Dióxido de Azufre. Por otra parte, el Terminal Marítimo ENAP emite Dióxido de Azufre producto del refinamiento de petróleo.

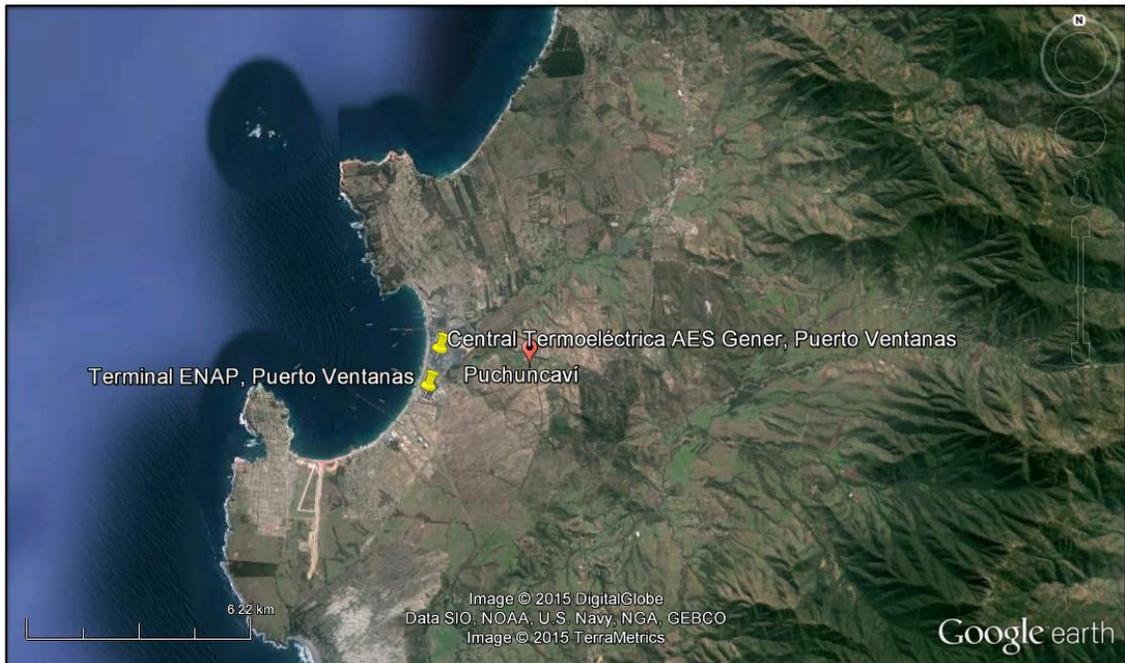


Figura 8.1: Distribución espacial del sitio *Puchuncaví* con respecto a la Central Termoeléctrica AES Gener y al Terminal Marítimo ENAP, principales emisores de SO₂ de la V región. Fuente: Elaboración propia.

El monitoreo con muestreadores de tipo pasivo realizado en *Puchuncaví* evidenció que el complejo industrial Ventanas es una fuente generadora Dióxido de Azufre, por lo que, resguardando la salud de la población del área circundante al puerto, debiese cerciorarse que no existan situaciones de emergencia ambiental, las cuales, tal como se comentó en el capítulo V: “Contaminantes Atmosféricos Criterio”, están asociadas a niveles de exposición como concentración de 1 hora.

Otro sitio en el cual se monitoreó una alta concentración de Dióxido de Azufre fue Coya (6,8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]), el cual también se encuentra cerca de un centro industrial de gran magnitud como lo es la división El Teniente de Codelco.

8.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO

Tabla 8.2: Concentración de NO₂ [µg/m³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de NO ₂ [µg/m ³] Monitoreado
Tiltit	24,3
Casablanca I	15,7
Coya	12,1
Melipilla I	24,6

Las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno expuestas en la tabla 8.2, son la suma del Dióxido de Nitrógeno generado por las emisiones del parque de vehículos motorizados que circulan por las vías locales (ya sean calles, avenidas y/o autopistas), más una porción proveniente de los grandes centros urbanos aledaños al sitio de monitoreo, ya que, tal como se expuso en la parte introductoria, el tiempo de recambio troposférico del Dióxido de Nitrógeno se estima del orden de algunos días, por lo tanto, su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional.

8.3 AMONÍACO

Tabla 8.3: Concentración de NH₃ [µg/m³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de NH ₃ [µg/m ³] Monitoreado
Lampa II	13,9
Coya	7,3
Melipilla I	14,7

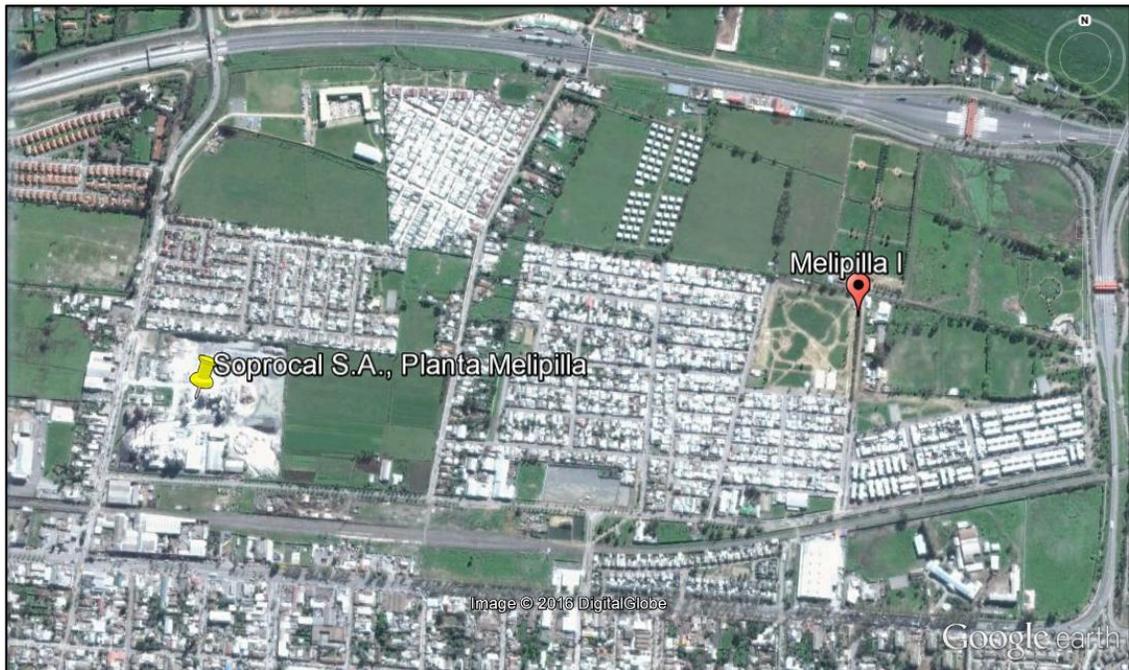


Figura 8.2: Distribución espacial del sitio *Melipilla I* con respecto a la Industria de Cales y Carbonatos Soprocal S.A. Fuente: Elaboración propia.

Considerando que la dirección predominante del viento en la comuna de Melipilla fue de oeste a este durante el período de monitoreo, el sitio *Melipilla I* recibe todas las emisiones residuales de Amoníaco provenientes de la Industria de Cales y Carbonatos Soprocal S.A. (**ver figura 8.2**), es por ello que posee la concentración más alta de la tabla 8.3 ($14,7 \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$).

Por otra parte, considerando que la dirección predominante del viento en la comuna de Lampa fue norponiente durante el período de monitoreo, y la existencia de un valle al norte de Santiago (**ver figura 7.5**), el sitio *Lampa II* recibiría las emisiones de Amoníaco de las plantas de tratamiento de aguas servidas *Tiltil* y *Curacaví*, ambas ubicadas a lo largo de este *corredor geográfico*. Estas emisiones se sumarían a las provenientes de la actividad agrícola, principal actividad económica de la comuna de Lampa ^[6].

8.4 OZONO

Tabla 8.4: Concentración de O₃ [µg/m³] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de O ₃ [µg/m ³] Monitoreado
Puchuncaví	22,4
Tiltil	30,7
La Calera	16,5
USACH	14,2
Lampa I	20,8
Lampa II	19,6
Los Andes I	26,0
Los Andes II	21,4
Valparaíso	24,8
Casablanca I	16,3
Casablanca II	18,0
Coya	26,4
Machalí	24,1
Paine	17,2
Buín	17,0
Curacaví I	26,7
Curacaví II	30,2
San Antonio	29,0
Melipilla I	14,3
Melipilla II	23,1
Talagante	18,0

El Ozono troposférico se forma principalmente como producto de la combinación de Óxidos de Nitrógeno y COV's (ambos contaminantes primarios) con Oxígeno, en presencia de radiación UV-B y en condiciones de altas temperaturas.

Dado que el Ozono troposférico es un contaminante secundario y que la dirección predominante del viento durante el período de monitoreo fue de oeste a este, los sitios con mayor concentración de Ozono son aquellos que se encuentran más cerca de la cordillera de Los Andes (**ver figura 8.3**).

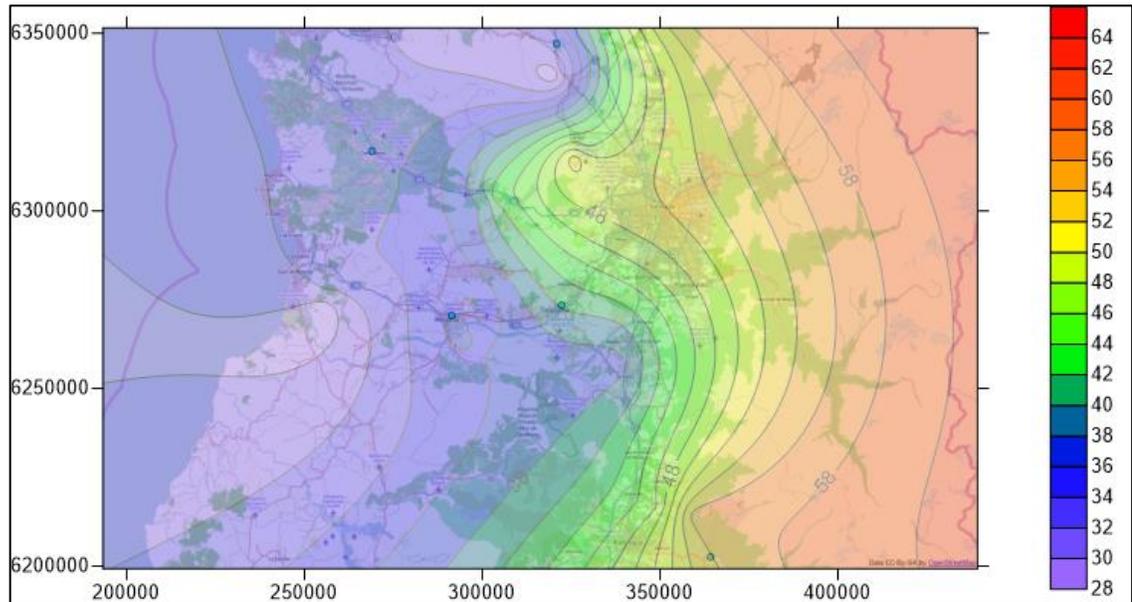


Figura 8.3: Distribución regional de las concentraciones de O₃ en [µg/m³]. Fuente: CMMCh

Las isólinas mostradas en la figura 8.3 fueron calculadas por el método estadístico Kriging⁹.

⁹ Método estadístico que interpola, a través del cálculo de un promedio ponderado, los valores contiguos. En esta técnica, los valores medidos son ponderados para calcular un valor predicho en una ubicación espacial no medida. Las ponderaciones están basadas en la distancia existente entre los puntos medidos, las locaciones predichas y el arreglo espacial entre los puntos.

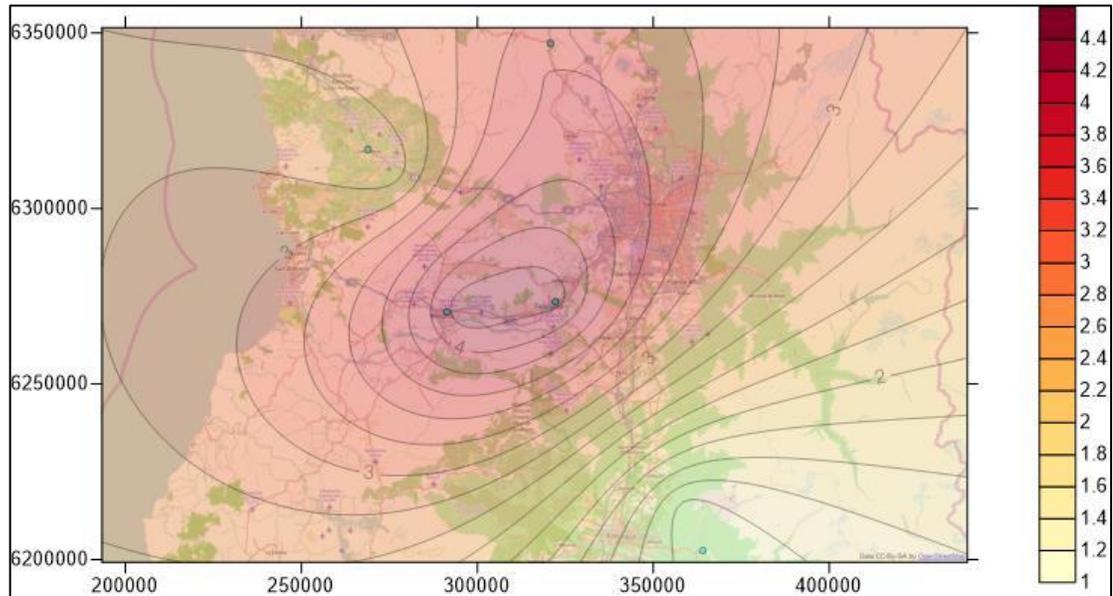
8.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Tabla 8.5: Concentración de COV's [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] monitoreado en cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Tolueno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	N-Octano [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Etil-Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	M+P-Xileno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	O-Xileno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	N-Nonano [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Tiltitl	0,61	2,60	0,17	0,40	1,30	0,48	0,27
Casablanca I	1,00	5,20	0,14	0,28	0,97	0,35	0,18
Coya	0,52	1,30	<0,13	0,19	0,83	0,25	0,14
Melipilla I	1,30	3,10	0,18	0,45	1,60	0,54	0,26
Talagante	1,90	5,10	0,39	1,00	4,00	1,20	0,59

Como se puede observar en la tabla 8.5, las mayores concentraciones de COV's se midieron en los sitios *Melipilla I* y *Talagante*. Esto es producto de la combustión incompleta del petróleo y sus derivados, utilizado como combustible de la maquinaria de la industria agropecuaria, actividad económica característica de esta zona.

Como se puede observar en la figura 8.4, las isolíneas calculadas por el método estadístico Kriging se aproximan a la dirección de los valles que sirven como vía de ventilación en la MZC: hacia el norte, hacia suroeste y hacia el sur (**ver figura 7.5**).



**Figura 8.4: Distribución regional de las concentraciones de COV's en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.
Fuente: CMMCh.**

Tal como se expuso en el capítulo V: “Contaminantes Atmosféricos Criterio”, los COV's son participes en la formación de Ozono troposférico. Es por ello que es de suma importancia monitorear los COV's, sobretodo el Tolueno, ya que puede contribuir en hasta un 40% a la formación de Ozono troposférico, debido a su foto-oxidación con los Óxidos de Nitrógeno [7].

9. RESULTADOS MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

Como parte de la evaluación del modelo de dispersión fotoquímico MATCH, se monitoreó de forma continua en 3 sitios de la MZC.

En la tabla 9.1 se resume el monitoreo activo, en donde se detalla el contaminante atmosférico monitoreado, el equipo de medición utilizado y las fechas de monitoreo para cada uno de los 3 sitios de la MZC.

Tabla 9.1: Tabla resumen del monitoreo activo en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Caracterización Química de la Fracción no Refractante del MP _{2,5}	Carbono Elemental
	Monitor de Especiación Química de Aerosoles	Equipo SIMCA
USACH	19/05/15 – 02/06/15	
Las Condes	03/06/15 – 08/07/15	
Melipilla	10/08/15 – 07/09/15	

9.1 USACH

Durante el día martes 19/05/15 y el día martes 02/06/15 se monitoreó de forma continua al costado derecho del galpón del Departamento de Mecánica de la USACH. Allí se ubicó una estación móvil de monitoreo de calidad del aire (**ver figura 9.1**), facilitada por el MMA, en dónde se instaló el Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* y el Etalómetro SIMCA.



Figura 9.1: Fotografía de la estación móvil de monitoreo de calidad del aire ubicada al costado derecho del galpón del Departamento de Mecánica de la USACH. Fuente: Elaboración propia.

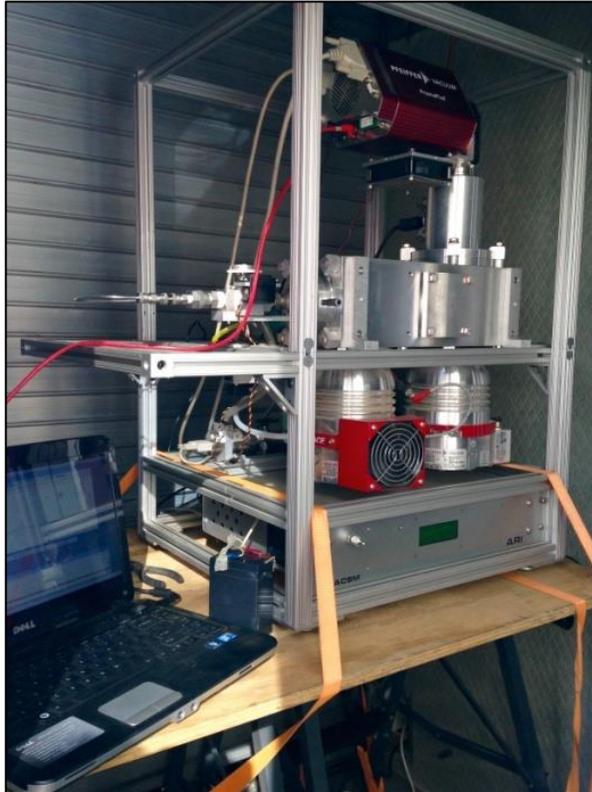


Figura 9.2: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* al interior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

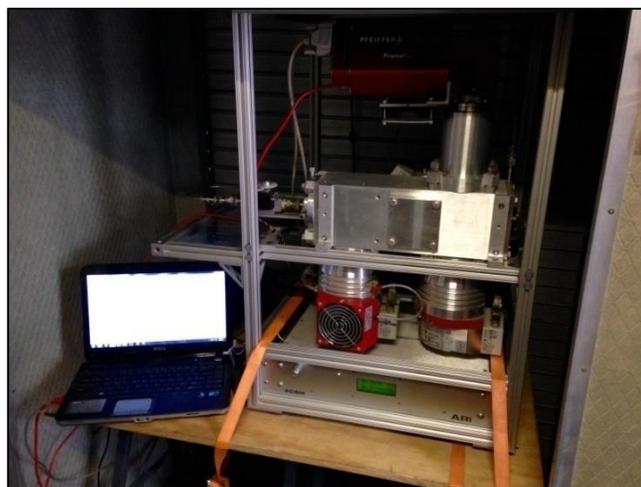


Figura 9.3: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* al interior de la estación móvil de monitoreo desde otra perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

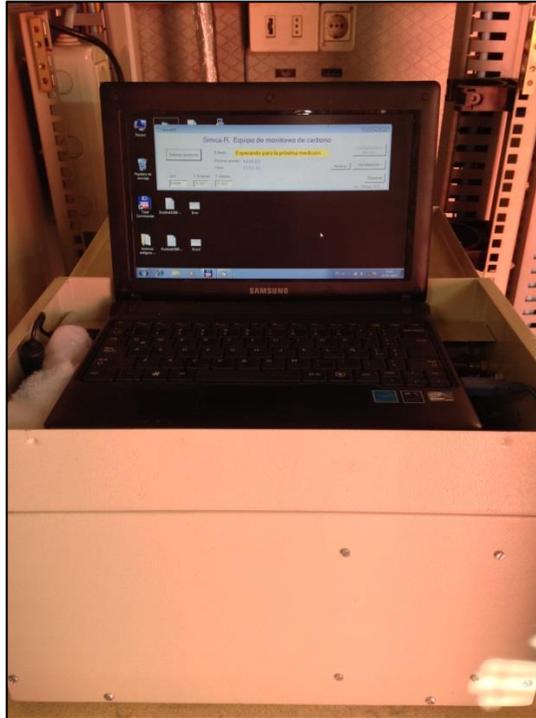


Figura 9.4: Fotografía del Etalómetro SIMCA al interior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

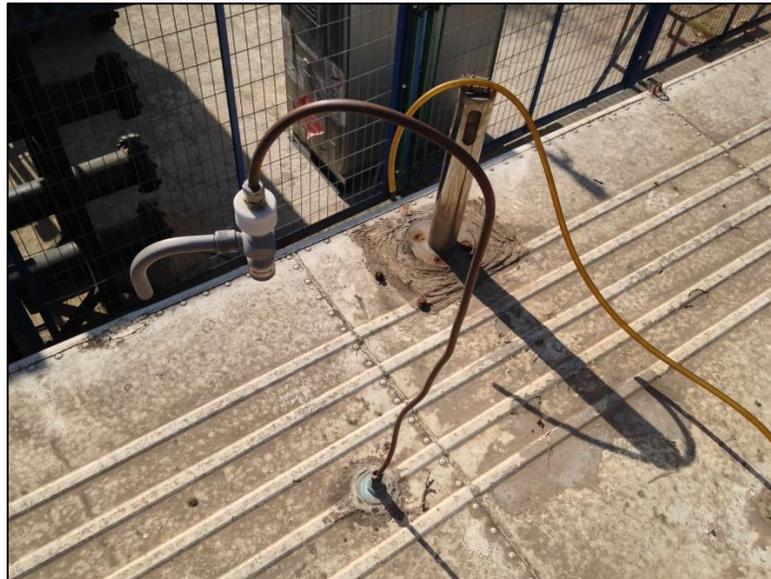


Figura 9.5: Fotografía del *inlet* del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* (izquierda), y del Etalómetro SIMCA (derecha), ambos instalados en la parte superior de la estación móvil de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

El promedio aritmético de MP_{2,5} Primario (BC + HOA + BBOA) en el sitio *USACH*, durante el día miércoles 29/10/14 y el día jueves 13/11/14, fue igual a 16,97 [µg/m³].

9.2 LAS CONDES

Durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15 se monitoreó de forma continua al costado izquierdo de la estación de monitoreo de calidad del aire Las Condes, del SINCA, perteneciente y operada por el MMA. Allí se ubica una unidad motora de contaminantes atmosféricos (**ver figura 9.6**), perteneciente al MMA, en dónde se instaló el Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* y el Etalómetro SIMCA.



Figura 9.6: Fotografía de la unidad motora de contaminantes atmosféricos ubicada al costado izquierdo de la estación de monitoreo Las Condes perteneciente a la red SINCA. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9.7: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* al interior de la unidad motora de contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9.8: Fotografía del Etalómetro SIMCA al interior de la unidad motora de contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.

El promedio aritmético de $MP_{2,5}$ Primario (BC + HOA + BBOA) en el sitio *Las Condes*, durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/17/15, fue igual a 3,83 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

9.3 MELIPILLA

Durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15 se monitoreó de forma continua en la parcela de Don Alejandro Oyola, hermano de Don Pedro Oyola, Director del CMMCh. El Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* y el Etalómetro SIMCA, pertenecientes y operados por CMMCh, se instalaron al interior de la bodega de una de las casas principales (ver figura 9.9).



Figura 9.9: Fotografía de una de las casas principales de la parcela de Don Alejandro Oyola. A la izquierda (señalada con una flecha de color amarillo) la bodega en donde se instalaron los equipos de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9.10: Fotografía del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* al interior de la bodega de una de las casas principales. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9.11: Fotografía del *inlet* del Monitor de Especiación Química de Aerosoles marca *Aerodyne Research Inc.* (arriba) y del Etalómetro SIMCA (abajo), ambos instalados en la parte posterior de la bodega. Fuente: Elaboración propia.

El promedio aritmético de $MP_{2,5}$ Primario (BC + BBOA) en el sitio *Melipilla*, durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15, fue igual a 1,55 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

10. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN WRF-MATCH

10.1 DIÓXIDO DE AZUFRE

A continuación una tabla con la concentración de SO₂ modelado por el WRF-MATCH para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC:

Tabla 10.1: Concentración de SO₂ [µg/m³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de SO ₂ [µg/m ³] Modelado
Puchuncaví	140,40
Tiltil	1,33
Coya	3,68
Paine	3,67
Melipilla I	1,94

10.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO

A continuación una tabla con la concentración de NO₂ modelado por el WRF-MATCH para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC:

Tabla 10.2: Concentración de NO₂ [µg/m³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de NO ₂ [µg/m ³] Modelado
Tiltil	8,58
Casablanca I	9,98
Coya	4,62
Melipilla I	17,94

10.3 AMONÍACO

A continuación una tabla con la concentración de NH₃ modelado por el WRF-MATCH para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC:

Tabla 10.3: Concentración de NH₃ [µg/m³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de NH ₃ [µg/m ³] Modelado
Lampa II	5,33
Coya	7,72
Melipilla I	22,88

10.4 OZONO

A continuación una tabla con la concentración de O₃ modelado por el WRF-MATCH para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC:

Tabla 10.4: Concentración de O₃ [µg/m³] modelado para cada sitio representativo de los cuadrantes de la grilla espacial de la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de O ₃ [µg/m ³] Modelado
Puchuncaví	34,71
Tiltil	43,42
La Calera	23,66
USACH	8,09
Lampa I	39,91
Lampa II	35,62
Los Andes I	32,24
Los Andes II	34,19
Valparaíso	32,11
Casablanca I	42,64
Casablanca II	41,34
Coya	46,93

Machalí	46,15
Paine	40,69
Buín	24,31
Curacaví I	42,64
Curacaví II	43,81
San Antonio	41,86
Melipilla I	40,04
Melipilla II	37,05
Talagante	40,82

10.5 MATERIAL PARTICULADO 2,5 PRIMARIO

A continuación una tabla con la concentración de MP_{2,5} Primario modelado por el WRF-MATCH para cada uno de los sitios de la MZC en donde se monitoreó de forma continua:

Tabla 10.5: Concentración de MP_{2,5} Primario [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] modelado para cada uno de los sitios de la MZC en donde se monitoreó de forma continua. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Concentración de MP _{2,5} Primario [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] Modelado
USACH	30,67
Las Condes	14,66
Melipilla	28,13

11. COMPARACIÓN DE LOS DATOS MONITOREADOS Y LOS MODELADOS

Para poder comparar datos simulados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH, con “corridos” del modelo WRF del año 2012, con datos monitoreados el año 2015, debemos considerar tres hechos:

- 1) Los inventarios de emisiones de las regiones que abarcan la MZC, utilizados como variable de entrada del WRF-MATCH, son los más actuales a la fecha (ver tabla 11.1).

Tabla 11.1: Ente desarrollador, año de realización y número de páginas de los inventarios de emisión correspondientes a las regiones que comprenden la MZC.

Fuente: Elaboración propia.

Inventario	Ente Desarrollador	Año de Realización	Cantidad de Páginas
V Región	Ambiosis, Universidad de Playa Ancha, SMHI, Apertum IT AB y Geadur	2011	555
Región Metropolitana	CMMCh	2014	153
VI Región	DICTUC	2008	505

- 2) Los resultados del monitoreo pasivo realizado el año 2015 se utilizaron como condiciones de borde para la modelación WRF-MATCH.

3) Según los datos recopilados de los anuarios climatológicos de la DMC, en la MZC, las concentraciones promedio de los parámetros meteorológicos utilizados como variable de entrada del WRF-MATCH (Humedad Relativa, Presión Media, Dirección e Intensidad del Viento) se han mantenido constantes estos últimos 4 años (**ver tabla 11.2**).

Tabla 11.2: Promedios mensuales de la Humedad Relativa, de la Presión Media, de la Dirección e Intensidad del Viento entre los meses de mayo y agosto de los años 2012 y 2015 en las estaciones meteorológicas de la DMC ubicadas en las regiones que abarcan la MZC. Fuente: Elaboración propia con datos de la DMC.

Estación Rodelillo								
Periodo		Parámetro Meteorológico						
Mes	Año	Humedad Relativa [%]			Viento: Dirección Dominante y Velocidad Media [kt]			Presión Media (al nivel de la estación) [hPa]
		8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	
Mayo	2012	83	48	61	VRB 1	S 6	SE 5	960,9
	2013	-	74	-	-	N 7	-	-
	2014	90	65	87	-	NW 6	-	-
	2015	84	49	60	VRB 1	S 6	SE 5	960,1
Junio	2012	88	56	68	VRB 1	S 4	VRB 2	962,3
	2013	-	78	-	-	N 6	-	-
	2014	89	67	91	-	S 8	-	-
	2015	87	57	67	VRB 1	S 4	VRB 2	962,5
Julio	2012	88	50	65	VRB 2	VRB 1	SE 5	963,3
	2013	-	69	-	-	N 7	-	-
	2014	88	66	87	-	S 7	-	-
	2015	89	56	68	VRB 2	VRB 1	SE 5	963,1
Agosto	2012	88	50	64	VRB 1	S 6	SE 6	963,4
	2013	-	60	-	-	S 14	-	-
	2014	87	66	85	-	NW 8	-	-
	2015	87	51	63	VRB 1	S 6	SE 6	963,9
Estación Santo Domingo								
Periodo		Parámetro Meteorológico						
Mes	Año	Humedad Relativa [%]			Viento: Dirección Dominante y Velocidad Media [kt]			Presión Media (al nivel de la estación) [hPa]
		8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	

Mayo	2012	86	70	87	CALMA	SW 7	CALMA	1008,4
	2013	89	68	86	A 0	W 6	A 0	1009,9
	2014	91	73	89	CALMA 0	W 4	CALMA 0	1009,6
	2015	87	69	88	CALMA	SW 7	CALMA	1008,3
Junio	2012	88	72	84	E 5	NW 6	CALMA	1009,5
	2013	90	69	88	SE 4	S 8	A 0	1010,5
	2014	88	71	85	SE 5	SW 6	CALMA 0	1010,1
	2015	89	73	85	E 5	NW 6	CALMA	1009,9
Julio	2012	88	64	83	E 4	S 9	CALMA	1011,3
	2013	88	68	84	SE 4	SW 6	A 0	1010,4
	2014	89	69	84	CALMA 0	SW 6	CALMA 0	1011,5
	2015	89	63	84	E 4	S 9	CALMA	1011,8
Agosto	2012	89	68	85	E 4	SW 9	CALMA	1011,6
	2013	89	62	81	SE 4	SW 7	A 0	1011,8
	2014	91	67	82	E 4	NW 8	CALMA 0	1010,0
	2015	89	68	85	E 4	SW 9	CALMA	1011,1
Estación Pudahuel								
Periodo		Parámetros Meteorológicos						
Mes	Año	Humedad Relativa			Viento: Dirección Dominante y Velocidad Media [kt]			Presión Media (al nivel de la estación) [hPa]
		8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	
Mayo	2012	83	48	61	VRB 1	S 6	SE 5	960,9
	2013	86	49	64	VRB 1	VRB 1	S 6	962,4
	2014	80	43	60	VRB 1	S 7	S 5	962,2
	2015	84	49	62	VRB 1	S 6	SE 5	960,1
Junio	2012	88	56	68	VRB 1	S 4	VRB 2	962,3
	2013	87	53	72	N 4	VRB 1	S 6	962,7
	2014	88	57	71	VRB 1	VRB 1	SE 5	962,5
	2015	87	57	67	VRB 1	S 4	VRB 2	962,1
Julio	2012	88	50	65	VRB 2	VRB 1	SE 5	963,3
	2013	87	54	69	VRB 1	VRB 1	S 5	962,7
	2014	83	53	68	VRB 1	VRB 1	S 5	963,7
	2015	89	49	66	VRB 2	VRB 1	SE 5	963,1
Agosto	2012	88	50	64	VRB 1	S 6	SE 6	963,4
	2013	86	48	62	VRB 1	S 6	S 6	963,9

	2014	85	48	65	VRB 1	S 6	S 6	962,4
	2015	87	51	64	VRB 1	S 6	SE 6	963,1
Estación Quinta Normal								
Periodo		Parámetros Meteorológicos						
Mes	Año	Humedad Relativa			Viento: Dirección Dominante y Velocidad Media [kt]			Presión Media (al nivel de la estación) [hPa]
		8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	
Mayo	2012	89	48	72	CALMA	SW 2	CALMA	955,6
	2013	92	49	73	CALMA 0	SW 3	A 0	957,2
	2014	89	45	71	CALMA 0	SW 2	CALMA 0	956,9
	2015	90	47	73	CALMA	SW 2	CALMA	955,2
Junio	2012	92	54	78	CALMA	SW 2	CALMA	956,9
	2013	94	49	81	CALMA 0	SW 2	A 0	957,5
	2014	94	57	81	CALMA 0	CALMA 0	CALMA 0	957,1
	2015	91	55	77	CALMA	SW 2	CALMA	956,5
Julio	2012	91	46	72	CALMA	SW 2	CALMA	958,0
	2013	95	52	80	CALMA 0	SW 2	A 0	957,5
	2014	88	52	77	CALMA 0	SW 2	CALMA 0	958,3
	2015	92	45	73	CALMA	SW 2	CALMA	958,1
Agosto	2012	90	47	70	CALMA	SW 2	CALMA	958,0
	2013	91	47	70	CALMA 0	SW 3	A 0	958,7
	2014	91	48	72	CALMA 0	CALMA 0	CALMA 0	957,2
	2015	89	48	69	CALMA	SW 2	CALMA	958,5
Estación Tobalaba								
Periodo		Parámetros Meteorológicos						
Mes	Año	Humedad Relativa			Viento: Dirección Dominante y Velocidad Media [kt]			Presión Media (al nivel de la estación) [hPa]
		8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	8 hrs.	14 hrs.	20 hrs.	
Mayo	2012	-	50	-	-	SW 3	-	941,5
	2013	88	47	-	A 0	SW 4	-	-

	2014	88	48	-	NE 2	SW 4	-	-
	2015	88	51	-	-	SW 3	-	-
Junio	2012	88	55	-	CALMA	SW 3	-	942,5
	2013	88	48	-	NE 3	SW 2	-	-
	2014	90	57	-	NE 2	SW 2	S 2	-
	2015	88	55	-	CALMA	SW 3	-	-
Julio	2012	91	48	-	NE 2	W 3	-	943,4
	2013	91	53	-	NE 2	SW 3	-	-
	2014	85	53	-	NE 2	SW 3	NE 2	-
	2015	91	48	-	NE 2	W 3	-	-
Agosto	2012	89	51	-	CALMA	SW 3	-	943,8
	2013	90	51	-	E 3	SW 3	-	-
	2014	88	48	-	NE 2	SW 3	SW 5	-
	2015	89	51	-	CALMA	SW 3	-	-

A continuación se comparará, por medio de histogramas de barras simples, el contaminante criterio modelado con el monitoreado, de manera de evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH.

11.1 DIÓXIDO DE AZUFRE

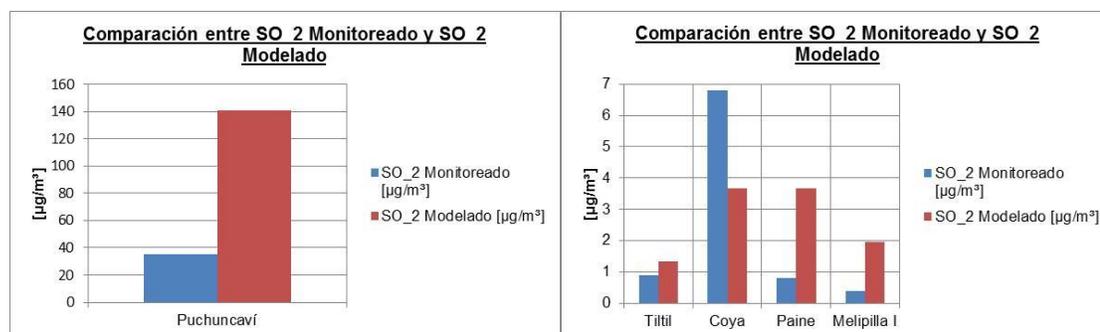


Figura 11.1: Comparación entre Dióxido de Azufre monitoreado y Dióxido de Azufre modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC (izquierda: sitio *Puchuncaví*; derecha: sitios *Tiltil*, *Coya*, *Paine* y *Melipilla I*). Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 11.1, las concentraciones de Dióxido de Azufre modeladas por el MATCH fueron sobrestimadas en 4 de los 5 sitios en donde se monitoreó, en un 273% (promedio error relativo porcentual).

El sitio *Puchuncaví* presenta el tercer mayor error relativo porcentual (**ver tabla 11.3**), ya que, al ubicarse muy cerca del complejo industrial Ventanas, la resolución espacial del MATCH es insuficiente para resolver los patrones locales de circulación de Dióxido de Azufre emitido por el complejo. Esto toma sentido al considerar que, según el inventario de emisiones de la V región, la comuna de Puchuncaví emite el 62% de Dióxido de Azufre de la región. Tal como se comentó en el capítulo VIII: “Resultados Monitoreo Pasivo en la MZC”, los mayores aportes de Dióxido de Azufre están asociados a las fundiciones de cobre y a las centrales termoeléctricas a carbón y a petróleo diesel.

Tabla 11.3: Dióxido de Azufre monitoreado, Dióxido de Azufre modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Región	SO ₂ Monitoreado [µg/m ³]	SO ₂ Modelado [µg/m ³]	Error Relativo Porcentual
Puchuncaví	V	35,00	140,40	301,14
Tiltil	RM	0,90	1,33	47,33
Paine		0,80	3,67	358,25
Melipilla I		0,40	1,94	358,00
Coya	VI	6,80	3,68	45,90
Promedio Error Relativo Porcentual				227,52

Los sitios *Paine* y *Melipilla I* presentan los mayores márgenes de sobrestimación (**ver tabla 11.3**). Ambos sitios recibirían las emisiones de Dióxido de Azufre emitidas por la Industria de Cales y Carbonatos Soprocál S.A., la cual posee un horno rotatorio a base de combustible no definido, con un Precipitador Electrostático como medida de abatimiento. Dado que el MATCH sobrestimó en un 358% (promedio error relativo porcentual) la concentración de

Dióxido de Azufre modelada en ambos sitios, el nivel de actividad del horno rotatorio sería menor al declarado, la medida de abatimiento no sería la declarada o el combustible¹⁰ considerado en el inventario de emisiones de la RM sería el incorrecto.

El sitio *Melipilla I* se encontraba a 1,17 [km] de la Industria de Cales y Carbonatos Soprocál S.A., por lo cual, al igual que en el sitio *Puchuncaví*, la resolución espacial del MATCH es insuficiente para resolver los patrones locales de circulación de Dióxido de Azufre emitidos por la industria.



Figura 11.2: Fotografía desde el sitio *Puchuncaví*. En el fondo, el complejo industrial Ventanas, ubicado a 2,6 [km] del sitio *Puchuncaví*. Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ Este puede ser: Gas Natural, Petróleo 6, Diésel o Carbón.

11.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO

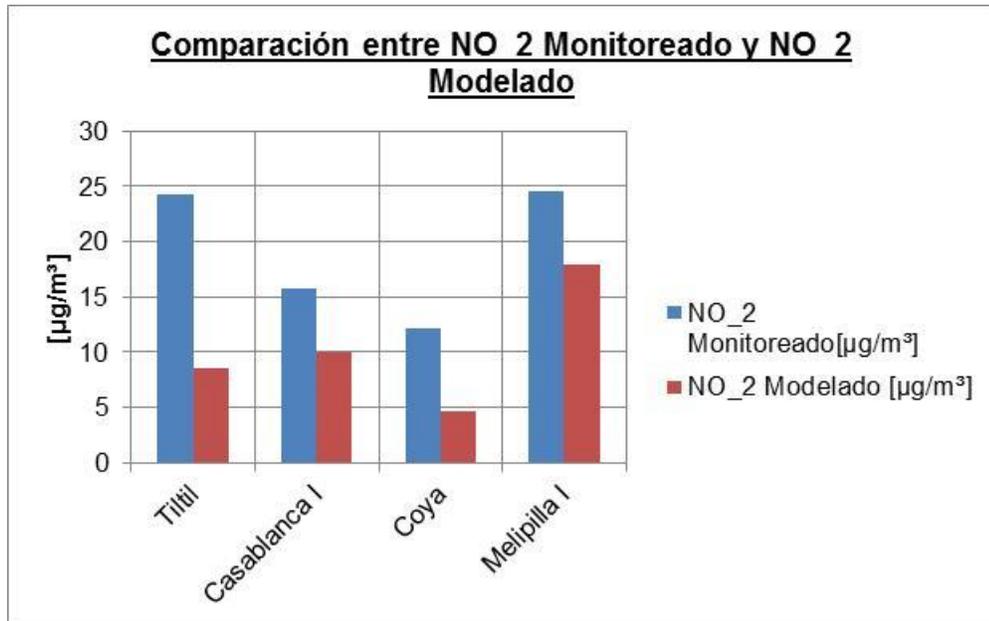


Figura 11.3: Comparación entre Dióxido de Nitrógeno monitoreado y Dióxido de Nitrógeno modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 11.3, las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno modeladas por el MATCH fueron subestimadas en un 48% (promedio error relativo porcentual).

La principal fuente emisora de Óxidos de Nitrógeno en la MZC es el transporte (V región: 56,48% del total de las emisiones, RM: 86,79% del total de las emisiones y VI región: 38,36% del total de las emisiones), el cual, luego de oxidarse en la atmósfera, se transforma en Dióxido de Nitrógeno. Considerando que el parque de vehículos motorizados de los sitios en donde se monitoreó aumentó en un 25,57% promedio del año 2012 a la fecha (*Casablanca I*: aumentó en un 38,57%, *Tiltit*: aumentó en un 29,75%, *Melipilla I*: aumentó en un 16,43% y *Coya*: aumentó en un 17,52%)^[9], se podría justificar la subestimación de Dióxido de Nitrógeno.

De todas formas no existe una correlación entre el aumento del parque automotriz motorizado y el porcentaje de subestimación (mayor aumento, mayor subestimación), por lo que debiese analizarse la evolución de las otras fuentes emisoras de Dióxido de Nitrógeno (categoría “Industrial” principalmente).

En el inventario de emisiones de la RM existe una categoría denominada “Transporte” (Transporte en Ruta + Construcción¹¹). Dentro de esta categoría existe una subcategoría denominada “Fuera de Ruta: Sector Construcción”, la cual consideró la información entregada en el estudio “Elaboración de Diagnóstico e Inventario de Emisión”, en el cual se realizó un inventario de emisiones para la maquinaria existente en el sector de la construcción en la RM. Los cálculos de emisiones por comuna se realizaron con la información de metros cuadrados de edificación habitacional por comuna disponible en el sitio web del MINVU. De esta manera se distribuyeron las emisiones estimadas a nivel regional según porcentaje de participación en la construcción. Según datos del MINVU ^[10], los metros cuadrados de edificación habitacional¹² de la RM han aumentados en un 85,64% a la fecha (por ende cada comuna que la componen). Esto implica que las emisiones de NO_x asociadas a esta subcategoría han aumentado a la fecha.

Otra subcategoría dentro del inventario de emisiones de la RM es la denominada “Fuera de Ruta: Aeropuerto”, la cual consideró la información del estudio “Actualización Memoria de Cálculo de Emisiones Aeropuerto Arturo Merino Benítez, año 2010” (Algoritmo, 2011), donde se calcularon las emisiones de la operación del aeropuerto, flujo vehicular que accede al aeropuerto, y las emisiones de fuentes, como quemas agrícolas y erosión eólica del sector suroeste del aeropuerto. Según estadísticas históricas de la Junta de

¹¹ Corresponde a vehículos fuera de ruta, utilizados en el sector construcción.

¹² Viviendas aprobadas e iniciadas. Sectores privado y público.

Aeronáutica Civil ^[11], el transporte aéreo de pasajeros en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez ha aumentado en un 39% del 2011 a la fecha. Esto implica que el nivel de actividad asociado al Aeropuerto ha aumentado (Aeronaves, Grupo de Soporte Terrestre, Unidades de Energía Auxiliar), y por ende las emisiones de NO_x asociadas a esta subcategoría.

Tabla 11.4: Dióxido de Nitrógeno monitoreado, Dióxido de Nitrógeno modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Región	NO ₂ Monitoreado [µg/m ³]	NO ₂ Modelado [µg/m ³]	Error Relativo Porcentual
Casablanca I	V	15,70	9,98	36,43
Tiltil	RM	24,30	8,58	64,69
Melipilla I		24,60	17,94	27,07
Coya	VI	12,10	4,62	61,82
Promedio Error Relativo Porcentual				47,50

11.3 AMONÍACO

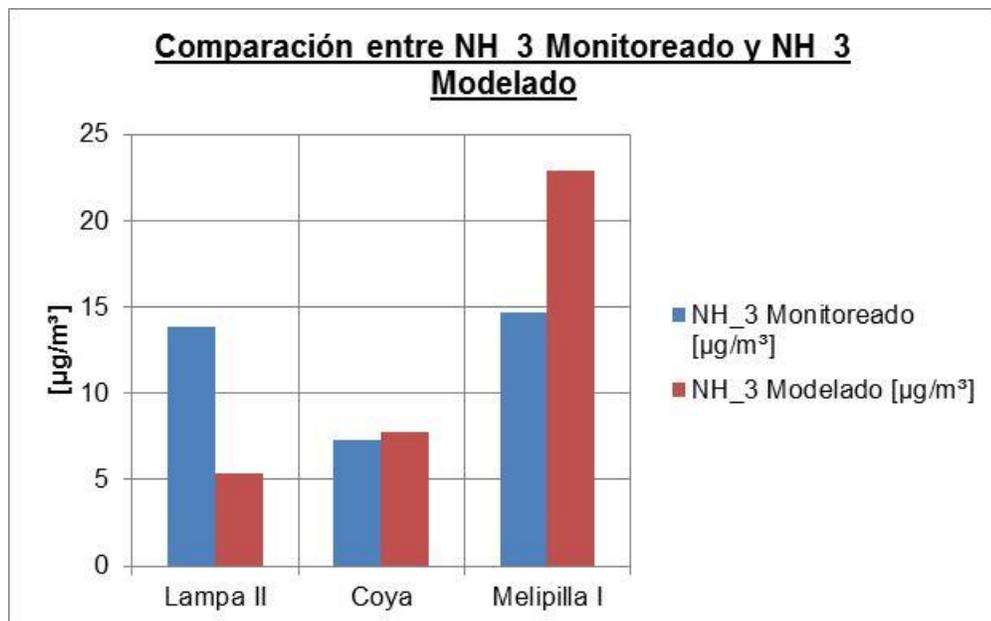


Figura 11.4: Comparación entre Amoníaco monitoreado y Amoníaco modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 11.4, las concentraciones de Amoníaco modeladas por el MATCH fueron sobrestimadas en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó, en un 31% (promedio error relativo porcentual). Estos 2 sitios, *Lampa II* y *Melipilla I*, están ubicados en comunas en donde la principal actividad económica es la industria agropecuaria (uso de fertilizantes y crianza de animales) ^[12].

Una de las principales fuentes emisoras de Amoníaco es el uso de fertilizantes con base en Nitrógeno. La concentración de Amoníaco emitida a la atmósfera depende del tipo de fertilizante aplicado, y se expresa como porcentaje del contenido de Nitrógeno del fertilizante.

En el inventario de emisiones de la RM, se utilizó, debido a la falta de información del sector, la metodología (alternativa) propuesta por el inventario especializado de Amoníaco desarrollado por Sistam Ingeniería para la Subsecretaría del Medio Ambiente en el año 2011. Esta metodología utiliza las tasas de demanda de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) actualizadas al año del inventario.

Las hectáreas por tipo de cultivo en la RM se multiplican por la tasa de aplicación de nutrientes, obteniendo el consumo de Nitrógeno para cada cultivo y comuna. La pérdida de Nitrógeno se expresa como un porcentaje del total Nitrógeno en el fertilizante. Para calcular las emisiones de Amoníaco se utiliza el factor de ponderación (17/14), el cual fue sacado de la metodología propuesta en el informe “*Modelling of Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from a Agricultural Sources in Europe*” (KlimontZ, 2004).

Otra de las principales fuentes emisoras de Amoníaco es la crianza de animales. En el inventario de emisiones de la RM, se utilizó la metodología

planteada por “Modelling of Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from a Agricultural Sources in Europe” (KlimontZ, 2004). Esta metodología, de tipo descendente, considera cuatro actividades principales asociadas a la generación de emisiones de Amoníaco: 1) alojamiento de animales, 2) almacenamiento de estiércol, 3) pastoreo de animales (rumiantes, equinos) y 4) aplicación de estiércol sobre el suelo como fertilizante.

Las emisiones de Amoníaco debido a la crianza de animales están dadas por la siguiente ecuación:

$$E_{NH_3} = 1.21 \cdot FE_{NH_3-N} \cdot NA \quad [11.1]$$

donde FE_{NH_3-N} es el factor de emisión y NA el nivel de actividad.

El factor de emisión varía según la actividad agraria (alojamiento de animales, aplicación de estiércol al suelo como fertilizante y pastoreo de animales) y el tipo de animal (cerdos, aves, bovinos, ovinos, caprinos, camélidos y equinos). Estos factores de emisiones fueron desarrollados el año 2001 por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en base a estudios específicos. El hecho que estos factores de emisiones debiesen actualizarse considerando las condiciones meteorológicas locales y las diferentes condiciones de alojamiento de manejo de residuos existentes en la zona de estudio, puede repercutir en el cálculo de emisiones de Amoníaco. Cabe señalar que dentro de las actividades agrarias contempladas para el cálculo del factor de emisión, la metodología no considera el “almacenamiento de estiércol”, hecho que pudo haber reducido la concentración de Amoníaco emitido asociada a esta subcategoría.

El nivel de actividad para cada comuna de la RM fue sacado del último Censo Agropecuario y Forestal¹³ (VII Censo Agropecuario Forestal 2006 - 2007), diferenciando si se trata de alojamiento de animales, aplicación de estiércol al suelo como fertilizante o pastoreo de animales.

El sitio *Coya* está ubicado en la comuna de Machalí (a 20,5 [km] del pueblo de Machalí). Sus principales actividades económicas son: “Comercio” (47,30%), “Actividades no Especificadas” (30,79%) y “Agricultura” (8,50%) [13]. Es por esto que la única actividad económica generadora de emisiones de Amoníaco en el sitio *Coya* es la agricultura.

En el inventario de emisiones de la VI región, la metodología utilizada para calcular las emisiones de Amoníaco asociadas a la subcategoría “Crianza de Animales”, es la planteada por “European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, 1994: Ammonia emissions to air in Western Europe”. Las actualizaciones de factores de emisión en el marco de los estudios efectuados en el AP-42 de la US EPA.

Al igual que en el inventario de emisiones de la RM, el nivel de actividad para cada comuna de la VI región fue sacado del último Censo Agropecuario y Forestal (VII Censo Agropecuario Forestal 2006 - 2007). Para la categoría “Aves”, la información fue obtenida mediante estadísticas proporcionadas por la Asociación de Productos Avícolas (APA), con cifras al año 2006, las cuales fueron distribuidas comunalmente según Censo del año 1997. Sin embargo, para comunas como La Estrella, se recurrió a lo reportado por el SEIA. El nivel de actividad calculado, utilizando el Censo del año 1997, fue proyectado para el año 2010 con el Censo del año 2006.

¹³ Observación: Es el último censo ya que se realiza cada 10 años, es decir, el próximo debiese ser el año 2017.

En el inventario de emisiones de la VI región no se especifica la metodología utilizada en la subcategoría “Fertilizantes”, hecho que repercute en la justificación de la sobrestimación de la concentración de Amoníaco modelada.

Como se puede observar en la figura 11.4, la concentración de Amoníaco modelada por el MATCH en el sitio Coya está sobrestimada en un 5,75% (promedio error relativo). Dicho margen no implicaría que la metodología utilizada para estimar las concentraciones de Amoníaco en la VI región sea la correcta, ya que el sitio Coya se encuentra encajonado por cerros (precordillera), hecho que no lo haría representativo de la VI región (desde el punto de vista topográfico).

Tabla 11.5: Amoníaco monitoreado, Amoníaco modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Región	NH ₃ Monitoreado [µg/m ³]	NH ₃ Modelado [µg/m ³]	Error Relativo Porcentual
Lampa II	RM	13,90	5,33	61,65
Melipilla I		14,70	22,88	55,65
Coya	VI	7,30	7,72	5,75
Promedio Error Relativo Porcentual				41,02

11.4 OZONO

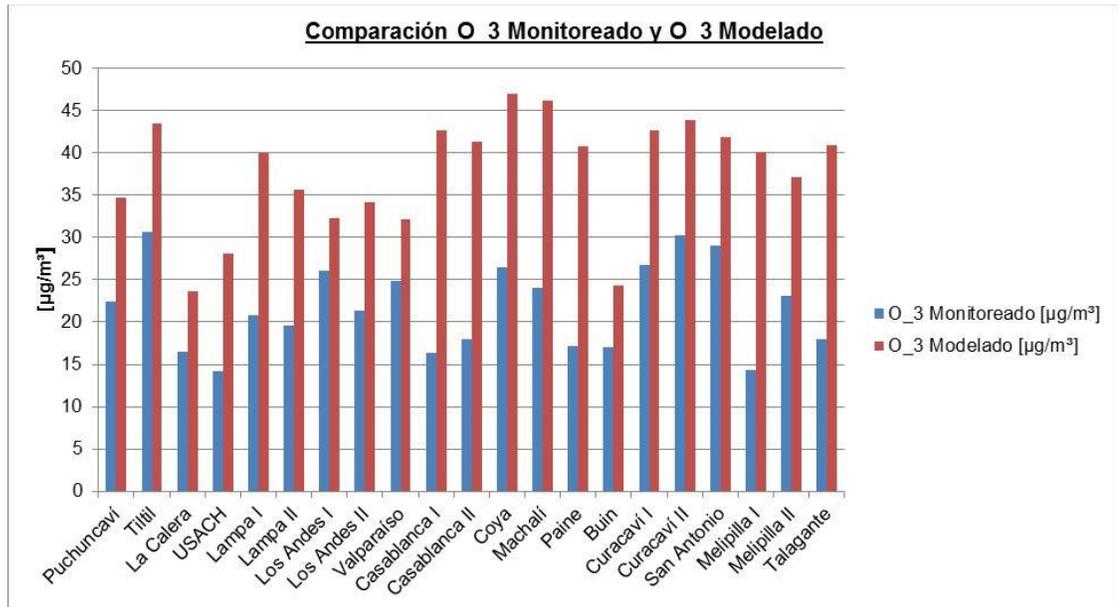


Figura 11.5: Comparación entre Ozono troposférico monitoreado y Ozono troposférico modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 11.5, las concentraciones de Ozono modeladas por el MATCH fueron sobrestimadas en todos los sitios en donde se monitoreó, en un 80% (promedio error relativo porcentual). Esto se debe principalmente a que dentro de los parámetros meteorológicos entregados por el modelo WRF a la DMC, no se encuentra el parámetro “nubosidad”, factor determinante en la oxidación de los compuestos primarios emitidos en la atmósfera.

Dado que el Ozono troposférico es un contaminante secundario, debemos considerar a sus precursores en el análisis, especialmente los COV's.

En la RM, una de las principales fuentes emisoras de COV's son las "Fuentes Evaporativas", las cuales representan el 29,29% del total de las emisiones de COV's de la región. Dentro de esta categoría existen 3 subcategorías: "Lavasecos", "Pintura de Vehículos" y "Artes Gráficas", las cuales representan el 1,56%, 3,45% y 61,85% del total de las emisiones de las "Fuentes Evaporativas" respectivamente. Estas 3 subcategorías no cuentan con información detallada.

La subcategoría "Lavasecos" no cuenta con la cantidad de solventes utilizados por todos los lavasecos de la RM. Para calcular la emisión de COV's por este ítem, utilizó la plataforma AIRVIRO, la cual las calcula agregando los datos de entrada, factor de emisión (0,0633 [kg/habitante]¹⁴) y nivel de actividad (se utilizó la población proyectada para el año 2012, según el INE para cada comuna de la RM) a una EDB de grilla específica.

La subcategoría "Pintura de Vehículos" no cuenta con la cantidad de pintura, el tipo de pintura (en base a agua o solventes), las prácticas de aplicado de pintura, etcétera, utilizados por todos los talleres de pintado existentes en la RM. Al igual que en la subcategoría "Lavasecos", para calcular las emisiones de COV's, se utilizó la plataforma AIRVIRO, la cual las calcula agregando los datos de entrada, factor de emisión (0,14 [kg/habitante]¹⁵) y nivel de actividad (se utilizó la población proyectada para el año 2012 según el INE para cada comuna de la RM) a una EDB de grilla específica.

Al igual que en la subcategoría "Lavasecos" y "Pintura de Vehículos", para calcular las emisiones de COV's de las pequeñas operaciones asociadas a la subcategoría "Artes Gráficas", se utilizó la plataforma AIRVIRO, la cual las

¹⁴ Jochen Theloke, 2005.

¹⁵ Programa de Inventario de Emisiones de México año 2000, SERMANAT.

calcula agregando los datos de entrada, factor de emisión (0,4 [kg/habitante]¹⁶) y nivel de actividad (se utilizó la población proyectada para el año 2012 según el INE para cada comuna de la RM) a una EDB de grilla específica. Para las fuentes puntuales asociadas a la subcategoría “Artes Gráficas” se utilizaron las emisiones reportadas por los estudios de evaluación de impacto ambiental de las principales fuentes emisoras de COV’s de la RM (INQUILIMA Ltda., ALUSA S.A., EDELPA S.A. y Empresas Jordan Ltda.).

Figura 11.6: Comparación entre O₃ monitoreado y O₃ modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia

Sitio	Región	O ₃ Monitoreado [µg/m ³]	O ₃ Modelado [µg/m ³]	Error Relativo Porcentual
Puchuncaví	V	22,40	34,71	55,00
La Calera		16,50	23,66	43,40
Valparaíso		24,80	32,11	29,50
Casablanca I		16,30	42,64	161,60
Casablanca II		18,00	41,34	129,70
San Antonio		29,00	41,86	44,30
Tiltil	RM	30,70	43,42	41,40
USACH		14,20	28,09	97,80
Lampa I		20,80	39,91	91,90
Lampa II		19,60	35,62	81,70
Los Andes I		26,00	32,24	24,00
Los Andes II		21,40	34,19	59,80
Paine		17,20	40,69	136,60
Buín		17,00	24,31	43,00
Curacaví I		26,70	42,64	59,70
Curacaví II		30,20	43,81	45,10
Melipilla I		14,30	40,04	180,00
Melipilla II		23,10	37,05	60,40
Talagante		18,00	40,82	126,80
Coya		VI	26,40	46,93
Machalí	24,10		46,15	91,50
Promedio Error Relativo Porcentual				80,00

¹⁶ AP-42, Fifth Edition, Volumen I, Chapter 4: Evaporation Loss Sources, 4.9.1: General Graphical Printing.

11.5 MATERIAL PARTICULADO 2,5 PRIMARIO

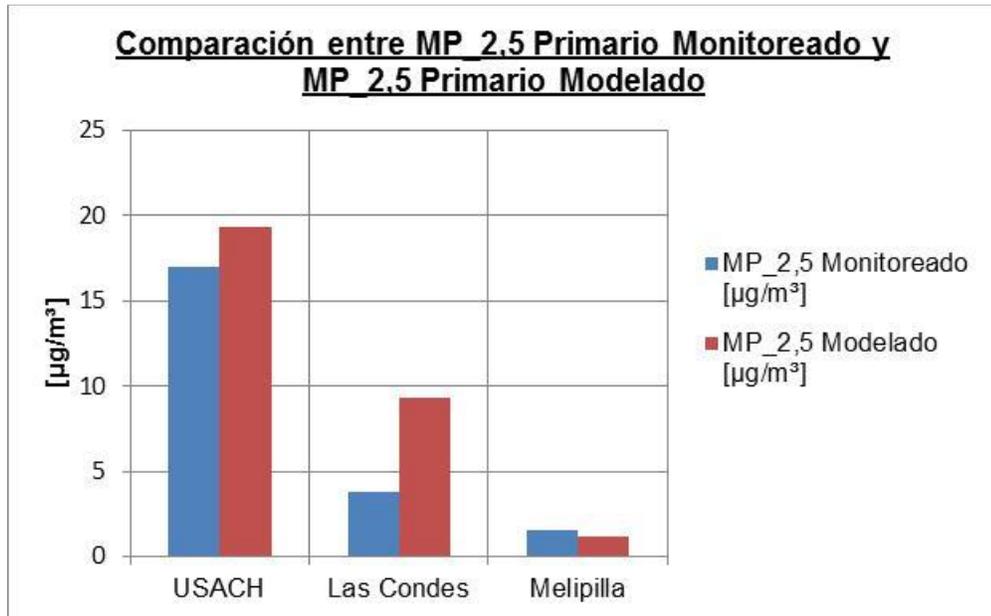


Figura 11.7: Comparación entre MP_{2,5} Primario monitoreado y MP_{2,5} Primario modelado, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 11.7, las concentraciones de MP_{2,5} Primario modeladas por el MATCH fueron sobrestimadas en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó, en un 78% (promedio error relativo porcentual). El sitio *Las Condes* presenta el mayor error relativo porcentual (**ver tabla 11.6**), ya que la intensidad del viento nocturno simulado por el WRF es levemente mayor al real, lo cual implicaría un mayor traslado de contaminantes primarios emitidos en el centro de la ciudad de Santiago (los cuales también están sobrestimados) hacia el sitio *Las Condes*.

Tabla 11.6: MP_{2,5} Primario monitoreado, MP_{2,5} Primario modelado y error relativo porcentual entre ambas concentraciones, para distintos sitios ubicados en la MZC. Fuente: Elaboración propia.

Sitio	Región	MP _{2,5} Primario Monitoreado [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MP _{2,5} Primario Modelado [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Error Relativo Porcentual
USACH	RM	16,97	19,30	13,73
Las Condes		3,83	9,30	142,82
Melipilla		1,55	1,20	22,58
Promedio Error Relativo Porcentual				59,71

Dado que el SMHI asumió un desglose ponderado del MP_{2,5} Total (Primario + Secundario) inventariado (**ver figura 11.8**), una sobrestimación en el cálculo de las emisiones anuales de MP_{2,5} Total de las distintas fuentes emisoras de la RM, justificaría los márgenes arrojados por la comparación.

	EC	OM	other
Stationary combustion and industrial processes	7%	7%	86%
Residential wood combustion	9%	62%	29%
Field burning	6%	87%	7%
Forest fires	4%	87%	9%
Machinery (incl. off-road)	43%	43%	25%
Fugitive emissions (VOC)	-	-	-
Road traffic light vehicles	29%	53%	17%
Road traffic heavy vehicles	67%	25%	8%
Agriculture	0%	32%	68%
Residential heating (excl. Wood)	10%	90%	0%

Figura 11.8: Desglose ponderado del MP_{2,5} en diferentes tipos de material particulado para cada categoría de emisión (EC: Carbono Elemental, OM: Material Orgánico, Other: Otros Constituyentes). Fuente: SMHI.

Por otra parte, en la subcategoría “Transporte en Ruta: Polvo Resuspendido MP_{2,5}” del inventario de emisiones de la RM, el cálculo de MP_{2,5} es muy alto (9,927 [ton/año]). El material resuspendido está formado principalmente por compuestos que provienen de la tierra, caracterizados por tener Silicio, Aluminio, Hierro, Calcio y otros similares, compuestos que no están presentes en las mediciones de MP_{2,5}, subestimando la concentración monitoreada en el sitio *Melipilla*.

En resumen, la comparación arrojó los siguientes resultados:

Tabla 11.7: Tabla resumen de la comparación entre la concentración modelada y la monitoreada para distintos contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia.

Contaminante Atmosférico	Sobrestimación/Subestimación modelado respecto al monitoreado	Explicación
SO ₂	Sobrestimado en 4 de los 5 sitios en donde se monitoreó	<p>V y XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> La resolución espacial del MATCH es insuficiente para resolver patrones locales de circulación de contaminantes atmosféricos emitidos por mega fuentes (V Región: Complejo Industrial Ventanas; XIII Región: Industria de Caes y Carbonatos Soprocal S.A.).
NO ₂	Subestimado en todos los sitios en donde se monitoreó	<p>V, VI y XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> Aumento en un 25,57% (promedio) del parque automotriz del año 2012 a la fecha en los sitios donde se monitoreó.
NH ₃	Sobrestimado en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó	<p>XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> Falta de información de la subcategoría “Fertilizantes y Plaguicidas”. Para la RM se utilizaron 2 metodologías para el cálculo de emisiones de Amoníaco asociadas a esta subcategoría. Desactualización de los factores de emisiones. Esta actualización debe considerar las condiciones meteorológicas locales y las diferentes condiciones de alojamiento de manejo de residuos existentes en la zona de estudio. <p>VI Región:</p>

		<ul style="list-style-type: none"> No se especificó la metodología utilizada en el desarrollo de la subcategoría “Fertilizantes” en el inventario de emisiones.
O ₃	Sobrestimado en todos los sitios en donde se monitoreó	<p>V, VI y XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> Falta del parámetro meteorológico “nubosidad” dentro de los productos entregados por el modelo WRF a la DMC. <p>XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> La subcategoría “Lavasecos” no cuenta con la cantidad de solventes utilizados por todos los lavasecos de la XIII región. La subcategoría “Pintura de Vehículos” no cuenta con la cantidad de pintura, el tipo de pintura (en base a agua o solventes), las prácticas de aplicado de pintura, etcétera, utilizados por todos los talleres de pintado existentes en la XIII región. Aumento en el nivel de actividad (proyección de la población para el año evaluado) utilizado para el cálculo de COV’s generados por la subcategoría “Lavasecos”, “Pintura de Vehículos” y “Artes Gráficas”.
MP _{2.5} Primario	Sobrestimado en 2 de los 3 sitios en donde se monitoreó	<p>XIII Región:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sobrestimación del MP_{2.5} Total inventariado. La intensidad del viento nocturno simulado por el WRF es levemente mayor al real.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos son “buenos” o “malos” dependiendo de la pregunta que se quiere contestar. Como se pudo observar en el capítulo XI: “Comparación de los Datos Modelados y los Monitoreados”, **el orden de magnitud de las concentraciones modeladas es el mismo que el de las monitoreadas (microgramos por metro cúbico)**, independiente del porcentaje de sobrestimación o subestimación del contaminante atmosférico. Dado que el modelamiento WRF-MATCH está enmarcado en el proyecto “Aporte Interregional a las Concentraciones de MP_{2,5} en la RM”, el cual tenía como objetivo general evaluar el aporte de MP_{2,5} y sus precursores a la RM, los valores son aceptables, ya que permiten cuantificar el impacto del MP_{2,5} (y sus precursores) generado en la V y VI región, en la RM.

Se evidenció:

- la necesidad de contar con una “pauta” para el desarrollo de los inventarios de emisiones de las distintas regiones de Chile. Más allá de ciertas similitudes, existen incongruencias (en los modelos y/o en las consideraciones utilizadas en el cálculo de las emisiones anuales de los contaminantes atmosféricos de una determinada fuente emisora) que repercuten, en este caso, en los valores simulados por el modelo de dispersión fotoquímico MATCH.
- la necesidad de establecer una periodicidad para el desarrollo de los inventarios de emisiones de las distintas regiones de Chile (cada 1 año, cada 5 años, etcétera). El hecho que se desarrollen en distintos años, complica entrecruzar información.

- la necesidad de ampliar el número de productos del modelo WRF entregados a la DMC (situación que ocurrió recién el año 2015, ampliando a 11 los productos entregados¹⁷), de manera de potenciar futuros modelamientos, ya sea permitiendo la ejecución del módulo fotoquímico del modelo de dispersión (formación de contaminantes secundarios) y/o la dispersión de contaminantes primarios y secundarios.

Por último, a modo de observación, dado que el periodo de simulación del WRF-MATCH es del 09/03/12 al 21/08/12, periodo del año (otoño y parte de invierno) durante el cual los episodios críticos de contaminación ambiental se incrementan en la MZC (sobre todo en la RM y en la cuenca de Rancagua), los datos expuestos en este Trabajo de Titulación pueden ser útiles para definir estrategias ambientales a futuro.

Con respecto al desarrollo de este Trabajo de Titulación, se proponen las siguientes sugerencias:

- Evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH durante otra estación del año, ya sea durante la primavera o el verano.
- Evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH variando las opciones de las parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo WRF, de manera de identificar las variables sensibles del modelo de dispersión fotoquímico MATCH.
- Evaluar la precisión del modelo de dispersión fotoquímico MATCH utilizando perfiles diurnos de concentraciones de contaminantes atmosféricos criterios.

¹⁷ En la Glosa nº 9 de la Ley de Presupuesto del año 2015, se solicita el mejoramiento del modelo WRF-DMC, de manera de potenciar el Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire en la RM y en otras regiones de Chile.

- Cuantificar la incertidumbre del modelo de dispersión fotoquímico MATCH ejecutándolo a la par con un conjunto de modelos de dispersión con las mismas variables de entradas.
- Que el MMA establezca una “pauta” con la metodología que se deba utilizar para el desarrollo de los inventarios de emisiones de las distintas regiones de Chile, junto con un monitoreo en línea (garantizando QA/QC) de las emisiones de las Mega Fuentes de Chile.
- Que el MMA establezca una periodicidad para la realización de los inventarios de emisiones de las distintas regiones de Chile.

BIBLIOGRAFÍA

Este Trabajo de Titulación se basó en las siguientes fuentes bibliográficas:

- Archivo Word “Macrozonas Geográficas Chilenas”, *bajado* de www.cartomap.cl.
- Air Dispersion Modeling, Foundations and Applications. Alex De Visscher. Editorial *Wiley*. Año 2014.
- Calidad del Aire en la Región Metropolitana, Análisis Retrospectivo 1997 - 2007, Gobierno de Chile, CONAMA, elaborado por el CMMCh en Diciembre de 2008.
- Contaminación Atmosférica Urbana, Episodios Críticos de Contaminación Ambiental en la Ciudad de Santiago. Raúl Morales (Editor). Editorial *Universitaria*. Año 2006.
- Inventario de Emisiones V Región de Valparaíso: “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica Región de Valparaíso, Construcción de un Inventario de Emisiones Regional”, elaborado por Ambiosis, Universidad de Playa Ancha, SMHI, Apertum IT AB y Geadur en Diciembre de 2011.
- Inventario de Emisiones Región Metropolitana: “Actualización y Sistematización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana”, elaborado por el Departamento de Física de la USACH en Abril de 2014.
- Inventario de Emisiones VI Región del Libertador General Bernardo O’Higgins: “Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Calidad del Aire VI Región”, elaborado por Ingeniería DICTUC en Enero de 2008.
- Normas Primarias de Calidad del Aire Vigentes en Chile, *bajadas* de <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>.
- Reporte del SMHI: “MATCH- Meso-scale Atmospheric Transport and Chemistry Modelling System”, elaborado por Robertson, Langner y Engardt en Septiembre de 1996.

REFERENCIAS

- [1]: Archivo Excel “País y Regiones Total: Actualización Población 2002 - 2012 y Proyecciones 2013 - 2020”, bajado de http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php.
- [2]: <http://www.calefaccionsustentable.cl/>.
- [3]: Report on Passive Samplers for Atmospheric Chemistry Measurements and Their Role in Gaw, 1997.
- [4]: Ferm, Svanberg. Cost-Efficient Techniques for Urban and Background Measurements of SO₂ and NO₂. Revista *Pergamon*. Año 1998.
- [5]: Jacques Mowrer. Diffusive Monitoring of C₆-C₉ Hydrocarbons in Urban Air in Sweden. Revista *The Analyst*. Año 1996.
- [6]: Estadísticas de la Gobernación Provincial de Chacabuco, sacadas de <http://www.gobernacionchacabuco.gov.cl/geografia>.
- [7] y [8]: Hoque. Spatial and Temporal Variation of BTX in the Urban. Revista *Science*. Año 2007.
- [9]: Archivos Excel “Anuarios Parque de Vehículos en Circulación” año 2012 y 2015, bajado de http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/parquevehiculos.php.
- [10]: Estadísticas sacadas de http://www.minvu.cl/opensite_20100805182505.aspx.
- [11]: Archivos Excel “Resumen Mensual Estadísticas Enero” año 2012 y 2015, bajados de <http://www.jac.gob.cl/estadisticas/estadisticas-historicas/>.
- [12]: Estadísticas de la Gobernación Provincial de Chacabuco y de Melipilla sacadas de <http://www.gobernacionchacabuco.gov.cl/geografia> y de http://www.gobernacionmelipilla.gov.cl/info_turismo/ respectivamente.

- **[13]:** Estadísticas de la comuna de Machalí, *sacadas* de http://www.machali.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=34.

GLOSARIO

- ACSM: Aerosol Chemical Speciation Monitor.
- APA: Asociación de Productos Avícolas.
- BC: Black Carbon (o Carbono Elemental).
- BTEX: Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos.
- CDT: Corporación del Desarrollo Tecnológico.
- CH₄: Metano.
- CMMCh: Centro Premio Nobel Mario Molina Chile.
- CO: Monóxido de Carbono.
- CONAF: Corporación Nacional Forestal.
- COV's: Compuestos Orgánicos Volátiles.
- DMC: Dirección Meteorológica de Chile.
- EDB (Emission Data Base) AIRVIRO: Módulo del Software libre AIRVIRO el permite la realización de inventarios de emisiones y emisiones agregadas.
- EPA: Environmental Protection Agency (de Estados Unidos).
- GLP: Gas Licuado de Petróleo.
- HIRLAM: High Resolution Limited Area Model.
- HOA: Hydrocarbon-like Organic Aerosol.
- INE: Instituto Nacional de Estadísticas.
- INIA: Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- IVL: Instituto Sueco de Investigación Ambiental.
- LV-OOA: Low-Volatility Oxygenated Organic Aerosol.
- MATCH: Multiple-Scale Atmospheric Transport and Chemistry Modeling System.
- MINSAL: Ministerio de Salud.
- MINVU: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

- MODEM: Modelo de Emisiones Vehiculares de la Secretaría de Planificación de Transporte.
- MP₁₀: Material Particulado con Diámetro Aerodinámico Inferior a 10 Micrones.
- MP_{2.5}: Material Particulado con Diámetro Aerodinámico Inferior a 2,5 Micrones.
- MZC: Macrozona Central de Chile.
- NH₃: Amoníaco.
- NH₄: Amonio.
- NO_x: Óxidos de Nitrógeno.
- NO₂: Dióxido de Nitrógeno.
- NO₃: Nitrato.
- O₃: Ozono.
- OMS: Organización Mundial de la Salud.
- RM: Región Metropolitana.
- SEC: Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
- SECTRA: Secretaría de Planificación de Transporte.
- SERVIU: Servicios de Vivienda y Urbanización.
- SINCA: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire.
- SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios.
- SMHI: Instituto Sueco de Hidrología y Meteorología.
- SO_x: Óxidos de Azufre.
- SO₂: Dióxido de Azufre.
- SV-OOA: Semi-Volatile Oxygenated Organic Aerosol.
- USACH: Universidad de Santiago de Chile.
- WRF: Weather Research and Forecasting.

ANEXO

13. ANÁLISIS RESULTADOS MONITOREO ACTIVO EN LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

13.1 USACH

La figura 13.1 muestra la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *USACH*, durante el día martes 19/05/15 y el día martes 02/06/15:

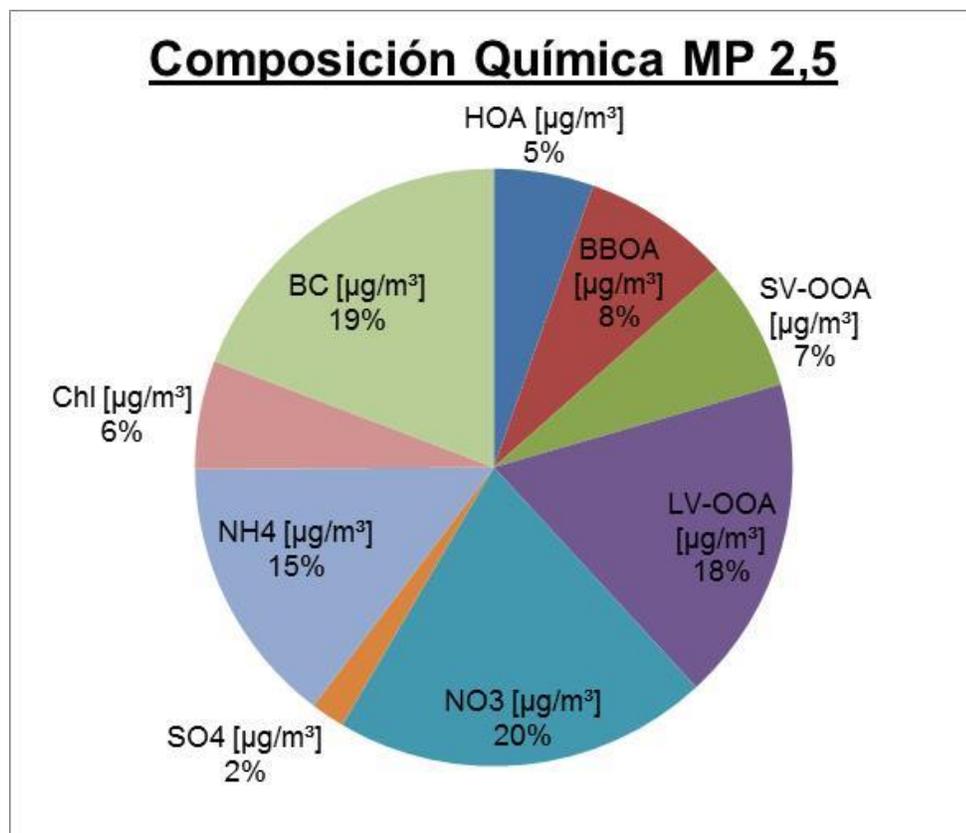


Figura 13.1: Composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *USACH*, durante el día martes 19/05/15 y el día martes 02/06/15. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en la figura 13.1, la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *USACH* durante el día martes 09/05/15 y el día martes 02/06/15 estuvo dominada por el Nitrato (NO_3), con un 20% de la concentración promedio total monitoreada. Luego le sigue el *Black Carbon* (BC), el Aerosol Orgánico Oxigenado con Baja Volatilidad (LV-OOA), el Amonio (NH_4), el Aerosol Orgánico Primario proveniente de la Combustión de Biomosas (BBOA), el Aerosol Orgánico Oxigenado Semi Volátil (SV-OOA), el Cloruro (Cl), el Aerosol Orgánico Hidrocarburado (HOA), y el Sulfato (SO_4), con un 19%, 18%, 15%, 8%, 7%, 6%, 5%, 2% respectivamente.

La figura 13.2 muestra el perfil promedio diurno de los componentes primarios del $MP_{2,5}$ en el sitio *USACH*, durante el día martes 19/05/15 y el día martes 02/06/15:

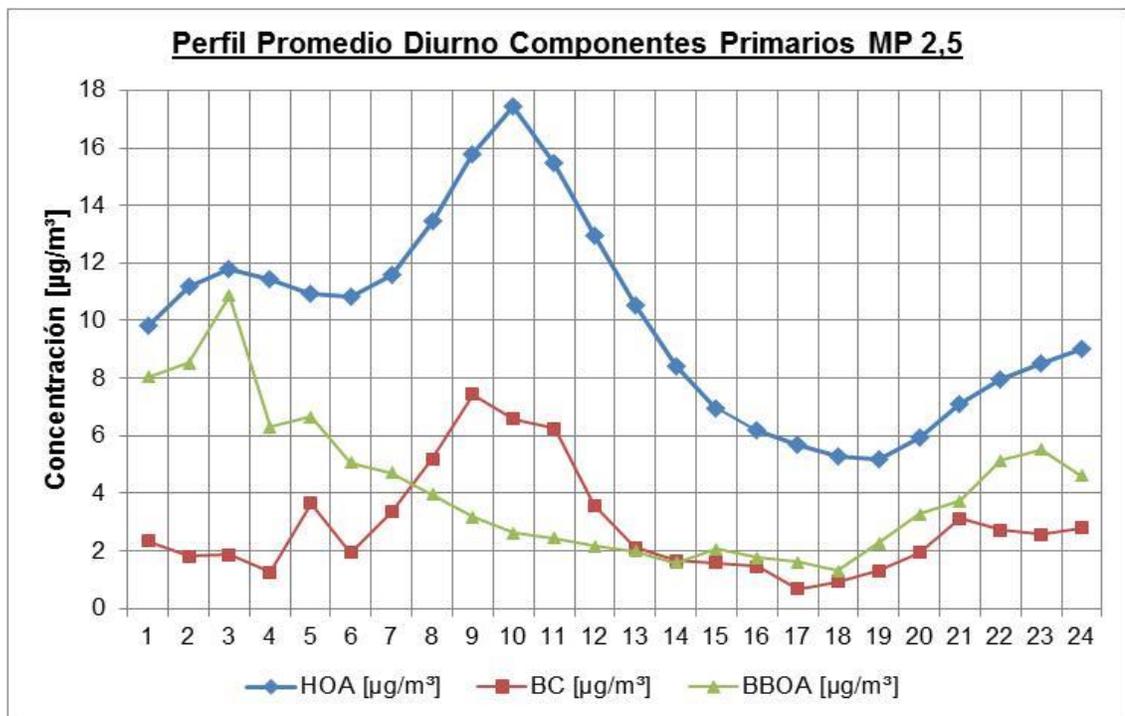


Figura 13.2: Perfil promedio diurno componentes primarios $MP_{2,5}$ en el sitio *USACH*, durante el día miércoles 29/10/14 y el día jueves 13/11/14. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en la figura 13.2, existe una correlación positiva entre la concentración promedio del BC y la del HOA (coeficiente de correlación de Pearson igual a 0,82), lo cual indica que ambos componentes primarios provienen de una misma fuente, la cual, en este caso, sería las emisiones vehiculares (combustión incompleta de combustibles derivados del petróleo), dado la proximidad del sitio *USACH* a grandes arterias capitalinas, como lo son la Avenida Libertador General Bernardo O'Higgins (por el este) y Avenida Matucana (por el sur). Entre las 6:00 - 9:00 horas, las concentraciones promedio de ambos contaminantes aumentan, hasta alcanzar sus valores máximos. Dicha situación tiene directa relación con que en ese horario el tráfico vehicular de las calles aledañas al sitio de monitoreo aumenta considerablemente.

Tal como se puede observar en el figura 13.2, la concentración promedio de BBOA aumenta en la noche, ya que este contaminante proviene de la combustión de biomasa (leña, pellet, etcétera), material utilizado como calefacción.

13.2 LAS CONDES

La figura 13.3 muestra la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Las Condes*, durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15:

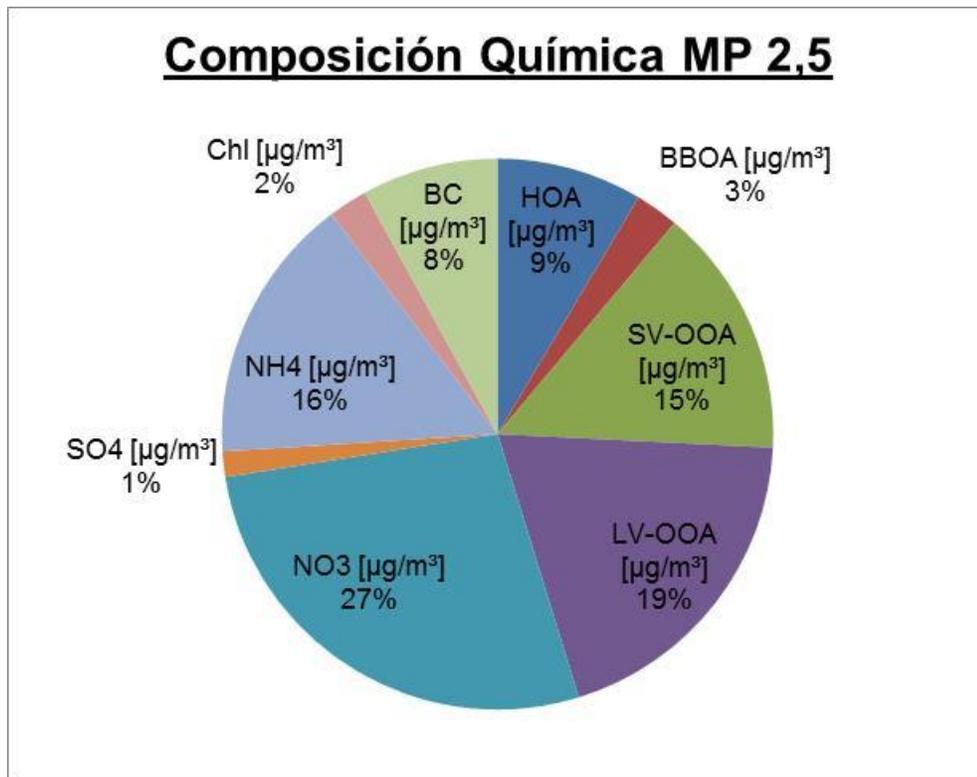


Figura 13.3: Composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Las Condes*, durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en el gráfico 13.3, la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Las Condes* durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15 estuvo dominada por el Nitrato (NO_3), con un 27% de la concentración promedio total monitoreada. Luego le sigue el Aerosol Orgánico Oxigenado con Baja Volatilidad (LV-OOA), el Amonio (NH_4), el Aerosol Orgánico Oxigenado Semi Volátil (SV-OOA), el Aerosol Orgánico Hidrocarburado (HOA), el *Black Carbon* (BC), el Aerosol Orgánico Primario

proveniente de la Combustión de Biomásas (BBOA), el Cloruro (Chl), y el Sulfato (SO₄), con un 19%, 16%, 15%, 9%, 8%, 3%, 2%, 1% respectivamente.

La figura 13.4 muestra el perfil promedio diurno de los componentes primarios del MP_{2,5} en el sitio *Las Condes*, durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15:

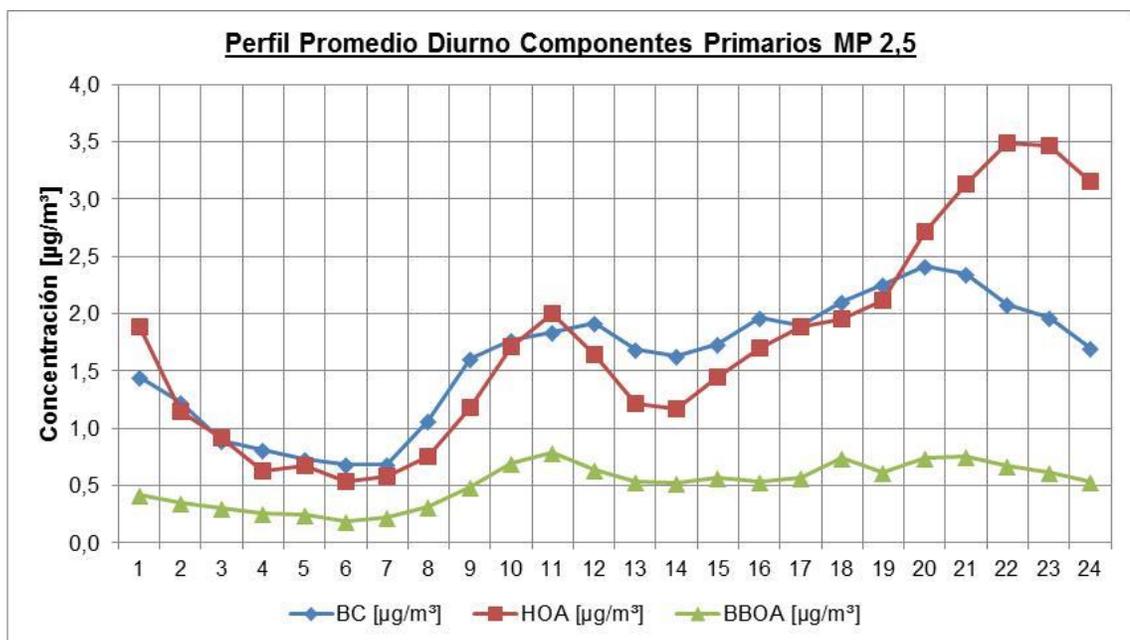


Figura 13.4: Perfil promedio diurno componentes primarios MP_{2,5} en el sitio *Las Condes*, durante el día miércoles 03/06/15 y el día miércoles 08/07/15. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en la figura 13.4, existe una correlación positiva entre la concentración promedio del BC y la del HOA (coeficiente de correlación de Pearson igual a 0,79), lo cual indica que ambos componentes primarios provienen de una misma fuente, la cual, al igual que en el sitio *USACH*, sería las emisiones vehiculares (combustión incompleta de combustibles derivados del petróleo), dado la proximidad del sitio *Las Condes* a grandes arterias

capitalinas, como lo son la Avenida Las Condes (por el norte) y la Avenida Presidente Kennedy (por el este).

Entre las 7:00 - 11:00 horas, las concentraciones promedio de ambos contaminantes aumentan, hasta alcanzar sus primeros *peak*. Dicha situación tiene directa relación con que en ese horario el tráfico vehicular de las calles aledañas al sitio de monitoreo aumenta considerablemente. Entre las 18:00 - 22:00 horas, las concentraciones promedios de ambos contaminantes vuelven a aumentar, hasta alcanzar sus segundos *peak*. Dicha situación tiene directa relación con que la dirección del viento preponderante durante el periodo de monitoreo fue noreste, lo cual implicó un traslado de contaminantes primarios emitidos en el centro de la ciudad de Santiago hacia el sitio *Las Condes*.

Tal como se puede observar en la figura 13.4, la concentración promedio de BBOA permanece constante durante el día (en torno a los 0,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]). Dado que el sector de Las Condes es receptor de la MZC, esta concentración promedio representaría la suma del fondo urbano de la ciudad de Santiago más las emisiones derivadas de la actividad portuaria del sector de San Antonio. Mencionar además que el BBOA proviene de las emisiones de la quema de leña, pellet, pastizales y/o incendios forestales.

13.3 MELIPILLA

La figura 13.5 muestra la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Melipilla*, durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15:

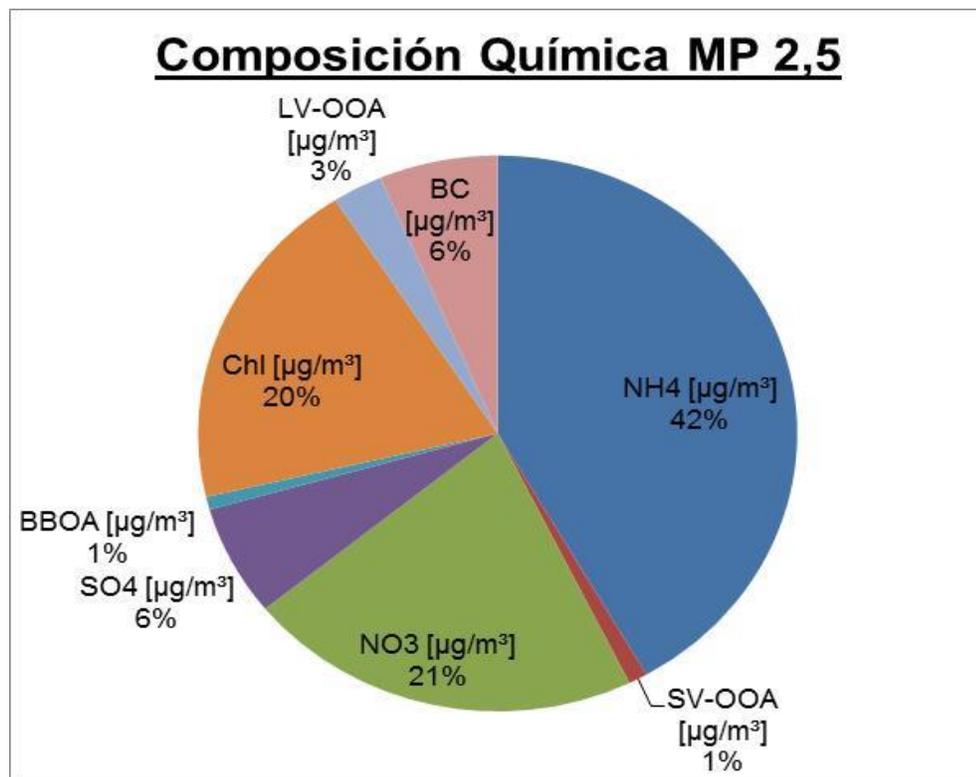


Figura 13.5: Composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Melipilla*, durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en la figura 13.5, la composición química del $MP_{2,5}$ en el sitio *Melipilla* durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15 estuvo dominada por el Amonio (NH_4), con un 42% de la concentración promedio total monitoreada. Luego le sigue el Nitrato (NO_3), el Cloruro (Chl), el sulfato (SO_4), el *Black Carbon* (BC), el Aerosol Orgánico Oxigenado con Baja Volatilidad (LV-OOA), el Aerosol Orgánico Oxigenado Semi Volátil (SV-OOA) y

el Aerosol Orgánico Primario proveniente de la Combustión de Biomásas (BBOA), con un 21%, 20%, 6%, 6%, 3%, 1%, 1% respectivamente.

La figura 13.6 muestra el perfil promedio diurno de los componentes primarios del MP_{2,5} en el sitio *Melipilla*, durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15:

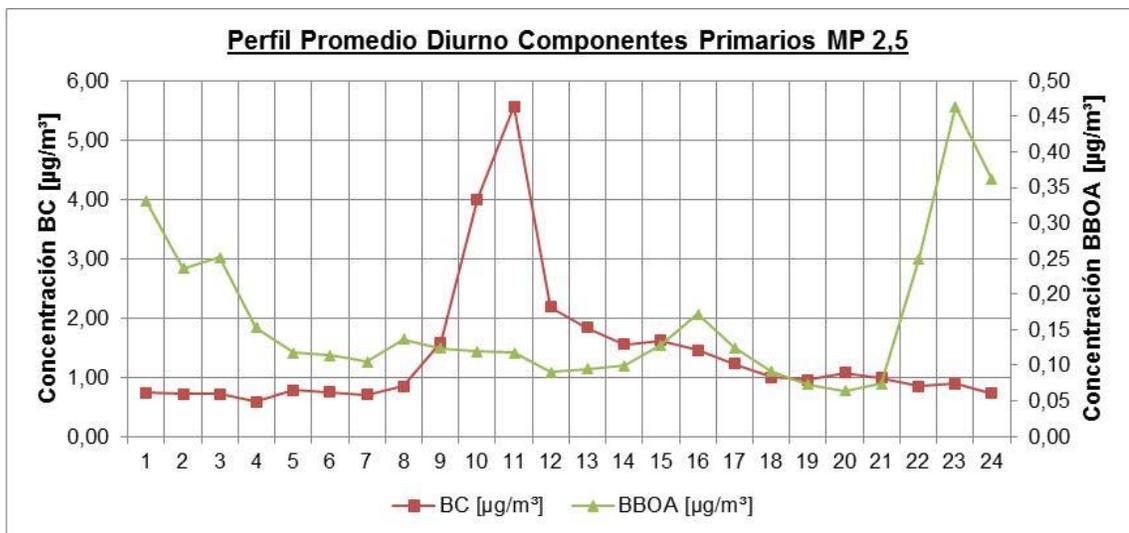


Figura 13.6: Perfil promedio diurno componentes primarios MP_{2,5} en el sitio *Melipilla* durante el día jueves 04/12/14 y el día viernes 09/01/15. Fuente: Elaboración propia.

De la figura 13.6 se desprende que existe una correlación negativa entre la concentración promedio del BC y del BBOA (coeficiente de correlación de Pearson igual a -0,26), lo cual indica que ambos componentes primarios provienen de fuentes distintas de emisión. El BC proviene de las emisiones de distintos tipos de maquinarias asociadas a la producción agropecuaria del sector, y el BBOA, de la quema de leña, pellet, pastizales y/o incendios forestales.

Tal como se puede observar en la figura 13.6, no se logró calcular las concentraciones promedio de HOA, ya que, al encontrarse el sitio *Melipilla* en una zona rural, las emisiones vehiculares son casi nulas (principal fuente emisora de HOA).