

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL
PROGRAMA INTERFACULTADES

**ESTUDIO INTEGRADO DE FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO
RESPIRABLE DE PUDAHUEL**

Tesis para optar al Grado de Magíster en
Gestión y Planificación Ambiental

GERARDO MAURICIO ALVARADO ZUÑIGA

Directora de Tesis
Prof. Dra. Margarita Préndez

Santiago, Chile.
2010



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL
PROGRAMA INTERFACULTADES

ESTUDIO INTEGRADO DE FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE
DE PUDAHUEL

GERARDO MAURICIO ALVARADO ZUÑIGA

Directora de Tesis:
Prof. Dra. Margarita Préndez

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Presidente:
Prof. Italo Serey E.

Profesor informante (1)
Prof. Laura Gallardo K.

Profesor informante (2)
Prof. Roberto Corvalán P.

Santiago, Chile
2010

Dedicada a mi familia, esposa e hijos

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a CENMA, especialmente a su ex director Profesor Raúl Morales, por financiar y entregar las facilidades para realizar el Magíster en Gestión y Planificación Ambiental.

A Víctor Berríos y Natalia Muñoz por facilitar la entrega de información de MP10 y MP2,5 de la red MACAM.

A Roberto Martínez por facilitar la entrega de información de las campañas de especiación físico-química realizadas en la Región Metropolitana.

A José Salim y Cristina Pereira por apoyarme con el procesamiento de información de emisiones de fuentes industriales y móviles.

A Diego Díaz por su apoyo en la generación de figuras georreferenciadas.

A Sergio Ibarra y Manuel Merino por su apoyo en la elaboración del Abstract.

A Laura Ortiz y Victor Sanhueza por su apoyo en el análisis estadístico.

A mi profesora guía Margarita Préndez por su motivación y sabios consejos para redactar, acotar y terminar esta tesis.

Por último agradecer a mis compañeros del magíster, a mis compañeros de trabajo en CENMA, a mis amigos, a mis familiares y a todo aquel que me animó a seguir adelante.

ABSTRACT

For decades the city of Santiago experiences a high degree of air pollution by particulate matter in the autumn-winter period, even in some days PM10 concentrations achieved dangerous levels to the health of people, especially children and elderly. In most of those days, the air quality monitoring station located in Pudahuel, registered the highest PM10 values, defining the relevant condition for the adoption of emission control measures and restrictions to the operation of stationary and mobile sources in all the Metropolitan Region.

The main objective of this study is to identify the causes that originate the high MP10 levels in Pudahuel, in order to contribute to improve Pudahuel's air quality management, reduce Pudahuel's PM10 peak concentrations, and contribute to the improving of air quality management in Santiago city.

The development of the thesis includes the compilation and critical review of PM10 information, meteorological data, PM10 emissions inventories, and physical-chemical speciation available for the metropolitan area, with particularly emphasis on Pudahuel. It is also included an analysis of two sampling campaigns performed by CENMA aiming for assess the spatial variability of PM10 concentrations in Pudahuel.

The analysis of PM10 concentrations shows that, in spite of the decreases observed in MACAM2 network (close to 50%), in the Pudahuel station the primary standards for PM10 has continue been exceeded. PM10 concentrations in all MACAM network stations have an accentuated annual cycle with a strong levels increase in between April and August. During these months, as a result of poor ventilation, especially during episodes type A, the highest hourly and daily concentrations of PM10 are registered in Pudahuel, reaching levels considered hazardous to human health, and therefore leading to the implementation of measures to control and reduce emissions in the city.

It was determined that during the hours of high PM10 level, the wind directions at the MACAM2 stations pointed towards Pudahuel station, but the wind in Pudahuel is weak, close to 0 m/s, which makes it difficult to transport MP10 to long distances; in fact, in a few kilometers of distance (La Farfana) the PM10 concentration do not have similar increase of concentrations. For this reason, it is postulated that there is a local component (local emissions) which has not been studied sufficiently, to explain the increase for PM10

concentrations in Pudahuel that reaches the highest levels considered all the MACAM2 air quality monitoring stations during episode days.

There is a spatial variability of PM10 concentrations in Santiago City and Pudahuel, even within the area of population representativeness of Pudahuel station (2 km radius), this situation can lead to take managements actions that could be not in accordance with the actual situation of pollution in Pudahuel, or in Cerro Navia, neither in the city.

The factors of the increase of concentrations of PM10 that has been identified for Pudahuel are the same as for the other monitoring stations in Santiago, i.e. local scale meteorological factors (mainly wind speed and wind direction), regional scale (type A and type BPF episodes) and particulate emissions. However, the PM10 increasing is associated with changes in the values of specific parameters of these factors. It was demonstrated statistically that the wind speed in Pudahuel has a different pattern behavior in relation to the other stations during type A episodes, which determined the high rate of concentrations increase, and prevents the dispersion of the emissions from nearby sources, i.e. very low wind speeds during the hours of greatest PM10 concentration. Increasing of MP10 concentrations also occurs in other monitoring stations, but with less intensity, which justifies to manage in a different way the problem of PM10 pollution in Pudahuel, and at the same time justifies that it should be not manage the Santiago city air quality based on Pudahuel.

The recommendations include proposals to control and reduce emissions of the PM10 coarse fraction, including replacement of deteriorated pavement in streets, paving unpaved roads, improving street verges and access to bus stations; and a street sweeping program.

In addition, to control the fine fraction of PM10 is recommended to encourage the development and installation of mitigation and control systems to lower emissions sources (bakeries, dry cleaning establishment, paint shops, service stations, eatery, etc.), as well to reduce emissions from electrical generators of factories in winter season.

RESUMEN

Desde hace décadas la ciudad de Santiago experimenta un alto grado de contaminación atmosférica por material particulado en la época de otoño-invierno; incluso durante algunos días se alcanzan concentraciones de MP10 consideradas peligrosas para la salud de las personas, especialmente para niños y ancianos. En la mayoría de esos días la estación de monitoreo ubicada en la comuna de Pudahuel presentó valores más altos, definiendo la condición relevante para la adopción de medidas de control de emisiones y restricciones al funcionamiento de fuentes fijas y móviles en toda la Región Metropolitana.

El objetivo principal del presente estudio es identificar los factores que originan los altos niveles de contaminación por MP10 en la comuna de Pudahuel a fin de disminuir las concentraciones máximas observadas en esa zona de la ciudad y contribuir al mejoramiento de la gestión de su calidad del aire y del de la ciudad de Santiago.

El desarrollo de la tesis incluye la recopilación y análisis crítico de la información de MP10, meteorología, emisiones de MP10 y especiación física y química disponibles para la Región Metropolitana, con especial énfasis en Pudahuel. Se incluye además, el análisis de dos campañas de monitoreo realizadas por CENMA para evaluar la variabilidad espacial de las concentraciones de MP10 en la comuna de Pudahuel.

El análisis de las concentraciones de MP10 muestra que a pesar de las disminuciones (cercasas a 50%) constatadas en la red MACAM2 para toda la ciudad, en la estación Pudahuel se continúa superando la norma primaria para MP10.

Las concentraciones de MP10 en todas las estaciones de la red MACAM tienen un marcado ciclo anual con un fuerte aumento de los niveles entre abril y agosto. Durante estos meses, producto de las malas condiciones de ventilación, especialmente durante episodios tipo A, las mayores concentraciones horarias y diarias de MP10 ocurren en Pudahuel llegando a niveles considerados peligrosos para la salud de las personas, lo cual conduce a la aplicación de medidas especiales de control y reducción de emisiones en toda la Región Metropolitana.

Se determinó que a las horas de mayor contaminación las direcciones de viento en las estaciones de la red MACAM2 se dirigen hacia Pudahuel, pero el viento en Pudahuel es débil, cercano a 0 m/s, lo cual dificulta el transporte desde grandes distancias; además, a pocos kilómetros (La Farfana) no se aprecia un aumento similar de las concentraciones. Por este motivo, se postula que hay una componente local (emisiones locales) que no ha sido suficientemente estudiada para explicar el aumento de las concentraciones en Pudahuel por

sobre los niveles registrados en el resto de las estaciones de la red de monitoreo de Santiago (MACAM) durante días de episodio, situación similar estaría ocurriendo en la nueva estación de monitoreo cercana, ubicada en Cerro Navia.

Existe una variabilidad espacial de las concentraciones de MP10 en Santiago y en la comuna de Pudahuel, incluso dentro de la zona de representatividad poblacional de la estación (radio de 2 km); esta situación puede conducir a adoptar acciones de gestión que no se condicen con la situación real de contaminación ni de la comuna de Pudahuel, ni de la comuna vecina de Cerro Navia, ni de la ciudad.

Los factores del aumento de concentración de MP10 identificados para Pudahuel son los mismos que para el resto de las estaciones de monitoreo en Santiago, es decir factores meteorológicos de escala local (principalmente velocidad y dirección de vientos), de escala regional (episodios tipo A y BPF) y emisiones de material particulado. Sin embargo, el aumento de las concentraciones está asociado a cambios en los valores de parámetros específicos de dichos factores. Se demostró estadísticamente que la velocidad de viento en Pudahuel tiene un patrón de comportamiento distinto al del resto de las estaciones durante episodios de tipo A, el que favorece el aumento de las concentraciones e impide la dispersión de las emisiones desde las fuentes cercanas, es decir velocidades muy bajas durante las horas de mayor concentración. El aumento de concentraciones de MP10 también ocurre en otras estaciones de monitoreo, pero con menor intensidad lo cual justifica gestionar de manera distinta el problema de la contaminación por MP10 en Pudahuel y al mismo tiempo justifica que no deba gestionarse la calidad del aire en toda la ciudad de Santiago en función de Pudahuel.

Las recomendaciones incluyen propuestas para controlar y disminuir las emisiones de la fracción gruesa del MP10, entre ellas reposición de pavimento en calles deterioradas, pavimentación de calles de tierra, mejora de bermas y accesos a los terminales de buses y un programa permanente de aspirado de calles.

Además, para el control de la fracción fina del MP10 se recomienda incentivar el desarrollo e instalación de sistemas de mitigación y control para fuentes de menores emisiones (panaderías, lavasecos, talleres de pintura, estaciones de servicio, cocinerías, etc); y disminuir las emisiones de los grupos electrógenos de las industrias que funcionan durante las tardes y noches de invierno.

INDICE

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Introducción | 1 |
| 2 | Hipótesis y Objetivos | 3 |
| 2.1 | Hipótesis..... | 3 |
| 2.2 | Objetivos..... | 3 |
| 3 | Marco Teórico | 4 |
| 3.1 | Origen, tamaño y distribución del material particulado en la atmósfera..... | 4 |
| 3.2 | Efectos del material particulado sobre la salud humana | 8 |
| 3.3 | Aspectos meteorológicos de la Región Metropolitana | 11 |
| 3.4 | Gestión de la calidad de aire en la Región Metropolitana | 15 |
| 4 | Materiales y método | 22 |
| 4.1 | Recopilación de información | 22 |
| 4.2 | Estudio crítico de la información recopilada | 23 |
| 4.2.1 | Información histórica de MP10 en Santiago y Pudahuel | 23 |
| 4.2.2 | Extensión geográfica de las concentraciones de MP10 en Pudahuel..... | 24 |
| 4.2.3 | Factores que afectan las altas concentraciones de MP10 en Pudahuel..... | 27 |
| 4.3 | Medidas del PPDA y otros estudios aplicados a la comuna de Pudahuel | 29 |
| 4.4 | Método para la elaboración de propuesta de medidas para disminuir las concentraciones de MP10 en Pudahuel | 29 |
| 5 | Resultados y discusión | 30 |
| 5.1 | Comportamiento de las concentraciones de material particulado medidas en Santiago..... | 30 |
| 5.2 | Comportamiento de las concentraciones de material particulado en Pudahuel..... | 39 |
| 5.3 | Extensión geográfica del área de concentraciones elevadas durante episodios de contaminación atmosférica en Pudahuel | 47 |
| 5.3.1 | Campaña CENMA 1999 | 47 |
| 5.3.2 | Campaña CENMA 2003 | 49 |
| 5.4 | Comparación de las variables meteorológicas en el área urbana de Santiago durante días de episodio..... | 55 |
| 5.5 | Comportamiento de MP10 con viento local en Pudahuel..... | 63 |
| 5.6 | Fuentes emisoras de MP10..... | 70 |
| 5.7 | Aporte de fuentes emisoras de MP a los niveles de concentración de MP10 de Pudahuel..... | 74 |
| 5.8 | Análisis crítico de las medidas de control y reducción de emisiones de MP10 contenidas en el PPDA de la Región Metropolitana y medidas de gestión de calidad de aire para la comuna de Pudahuel | 82 |
| 5.8.1 | Medidas estructurales del PPDA para control y reducción de emisiones | 83 |
| 5.8.2 | Plan Operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación..... | 85 |
| 5.8.3 | Medidas de gestión de calidad de aire especialmente adecuadas para Pudahuel .. | 87 |
| 6 | Conclusiones | 89 |
| 7 | Recomendaciones | 91 |
| 8 | Referencias bibliográficas | 93 |
| 9 | Anexos | 101 |
| | ANEXO: Plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3-1 Penetración de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio..... | 8 |
| Figura 3-2 Patrón de vientos durante tardes y noches de invierno..... | 12 |
| Figura 3-3 Patrón de vientos durante tardes y noches de verano | 12 |
| Figura 3-4 Esquema de episodios Tipo A y Tipo BPF | 13 |
| Figura 3-5 Cantidad de episodios Tipo A y BPF identificados en la Región Metropolitana, período 1997 a 2008..... | 14 |
| Figura 3-6 Ciclos diarios para todos los días y su variabilidad (sombreada). Ciclos diarios para días de episodios (azul), episodios tempranos (verde) y episodios tardíos (rojo), 2001-2003. | 15 |
| Figura 3-7 Evolución de los promedios anuales de MP10 y fracciones fina y gruesa asociada a las medidas de disminución de emisiones de MP10 en Santiago. Mediciones en estaciones Parque O’Hiigins, Las Condes y La Paz 1988 a 2008. | 20 |
| Figura 4-1 Ubicación de las estaciones Pudahuel, Municipalidad de Pudahuel y Parcela en La Farfana para la campaña de mediciones de MP10. Agosto-septiembre de 1999..... | 24 |
| Figura 4-2 Recorrido 1 con vehículo instrumentado en la zona de Pudahuel, julio de 2003 | 26 |
| Figura 4-3 Recorrido 2 con vehículo instrumentado en la zona de Pudahuel, julio-septiembre de 2003..... | 27 |
| Figura 5-1 Evolución de la cantidad de días sobre ICAP 100, 300 y 500 en las estaciones históricas de la red MACAM (mediciones con dicótomos) entre años 1989 y 2008..... | 30 |
| Figura 5-2 Evolución de la cantidad de días de contingencia ambiental por MP10 en las estaciones de la red MACAM2 (mediciones con equipos TEOM) entre años 1997 y 2008..... | 31 |
| Figura 5-3 Máximos diarios de concentraciones móviles de 24h de MP10 en Red MACAM2 y estación Pudahuel, período 1997 a 2008 | 32 |
| Figura 5-4 Promedios anuales de MP10 desde 1997 a 2008, mediciones con monitores TEOM en Red MACAM2 | 33 |
| Figura 5-5 Porcentaje de normas primarias de calidad de aire para MP10 en estaciones red MACAM2 para año 2008 | 34 |
| Figura 5-6 Evolución de promedios anuales de MP10 y fracciones fina y gruesa en la Red MACAM histórica, 1988-2007 | 35 |
| Figura 5-7 Evolución de promedios mensuales de MP2,5 y MP10. Estaciones históricas red MACAM, mediciones con dicótomo, 1988 a 2007..... | 36 |
| Figura 5-8 Ciclo promedio anual de fracciones a) Fracción fina y b) Fracción gruesa. | 37 |
| Figura 5-9 Ciclos diarios promedios de MP10 estaciones red MACAM2, período otoño-Invierno: a) año 1997; b) año 2007..... | 38 |
| Figura 5-10 Ciclos diarios promedio de MP10 estaciones red MACAM2, período primavera-verano: a) año 1997 y b) año 2007..... | 39 |
| Figura 5-11 Evolución de promedios de MP10 para meses abril-agosto, septiembre-marzo y promedio anual, años 1997 a 2008 | 40 |
| Figura 5-12 Promedio abril-agosto de fracción fina y gruesa de MP10 en Pudahuel, años 2001 a 2008..... | 40 |
| Figura 5-13 Promedios mensuales de MP10 y MP2,5, estación Pudahuel, período 1997 a 2008..... | 41 |
| Figura 5-14 Promedios mensuales de fracciones fina y gruesa de MP10 en Pudahuel, años 2001 a 2008..... | 42 |
| Figura 5-15 Promedios mensuales de fracción gruesa de MP10 en Pudahuel y fracción gruesa promedio Independencia-P.O’Higgins, años 2001 a 2008 | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 5-16 Ciclos diarios promedio de MP10 y MP2,5 en estación Pudahuel: a) para período abril-agosto entre los años 2004 y 2007; b) para los 11 mayores episodios ocurridos entre los años 2004 y 2007 | 43 |
| Figura 5-17 Perfil para 24 h de las concentraciones de las fracciones fina y gruesa del MP10 para días de episodio. Valores promedio para 48h para los 11 mayores episodios entre 2004 y 2007 | 44 |
| Figura 5-18 Ciclo diario de concentraciones de MP10 para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007..... | 45 |
| Figura 5-19 Ciclo diario de temperatura de MP10 para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007..... | 46 |
| Figura 5-20 Ciclo diario de velocidad de viento para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007..... | 47 |
| Figura 5-21 Concentraciones diarias de MP10 entre agosto y septiembre de 1999 | 47 |
| Figura 5-22 Ciclos diarios promedio de MP10, agosto de 1999 | 48 |
| Figura 5-23 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 20 y 23 horas, durante episodios tipo A entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003..... | 51 |
| Figura 5-24 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 23h y 02h horas, durante episodios tipo A entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003..... | 52 |
| Figura 5-25 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 20 y 23 horas durante episodios tipo BPF entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003. | 53 |
| Figura 5-26 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 23 y 02 horas durante episodios tipo BPF entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003. | 54 |
| Figura 5-27 Comparación de ciclos diarios de a) temperatura y b) humedad relativa para días de episodios tipo A entre 2004 y 2007 en estaciones de la red MACAM2. | 55 |
| Figura 5-28 Comparación de a) ciclos diarios de velocidad de viento y b) direcciones predominantes durante horas de altas concentraciones (18 a 23h) para 50 días de episodios tipo A entre 2004 y 2007 en estaciones de la red MACAM2..... | 56 |
| Figura 5-29 Dispersión de concentraciones horarias de MP10 con variables meteorológicas para 50 días de episodio tipo A en estación Pudahuel, años 2004 a 2007 | 57 |
| Figura 5-30 Distribución de velocidades de viento para cada estación, episodios tipo A y tipo BPF, años 2004 a 2007 | 58 |
| Figura 5-31 Vista 3D de la ubicación de las estaciones de la red MACAM2. | 60 |
| Figura 5-32 Ciclo diario promedio de velocidad de viento (2004 a 2007) en Las Condes, La Florida, El Bosque y Pudahuel para 35 días de episodios tipo A (a) y 19 días tipo BPF (b). | 61 |
| Figura 5-33 Comparación de ciclos diarios promedio entre MP10 en Pudahuel y velocidad de viento en Las Condes para 50 días de episodios tipo A entre 2004 y 2007..... | 61 |
| Figura 5-34 Direcciones predominantes del viento para días de episodio Tipo A, a las horas de mayor concentración de MP10 (18 a 23h) en estaciones de la red MACAM2, 2004 a 2007..... | 62 |
| Figura 5-35 Direcciones predominantes del viento para días de episodio Tipo BPF, a las horas de mayor concentración de MP10 (18 a 23h) en estaciones de la red MACAM2 | 63 |
| Figura 5-36 Correlación entre concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento en estación Pudahuel, abril-agosto 2004 a 2007 | 64 |
| Figura 5-37 Correlación de MP10 con la dirección del viento en Pudahuel..... | 64 |
| Figura 5-38 Correlación entre las concentraciones de MP10 de promedios diarios y la velocidad de viento en Pudahuel. Abril a agosto de 2004 a 2007 | 65 |
| Figura 5-39 Ciclo diario de concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento para el período abril-agosto de 2004 y 2007 en la estación Pudahuel..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-40 Ciclo diario de concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento, en días con concentraciones de MP10 sobre la norma. Período Abril-Agosto de 2004 y 2007 en estación Pudahuel | 66 |
| Figura 5-41 Ciclo diario a) concentraciones horarias promedio de MP10 para días de episodio tipo A, tipo BPF y días bajo norma y b) velocidad del viento. Período abril- agosto de 2004 a 2007 en la estación Pudahuel..... | 67 |
| Figura 5-42 Ciclo diario a) concentraciones horarias promedio de MP10 en estación Las Condes y b) velocidad de viento en estación Las Condes, para días con concentraciones de MP10 mayores al valor de la norma en la estación Pudahuel durante episodios tipo A y BPF de 2004 a 2007 (incluye una serie con el promedio de días bajo norma)..... | 68 |
| Figura 5-43 Ubicación de las principales fuentes emisoras en la zona de Pudahuel (emisiones en kg/año) | 71 |
| Figura 5-44 Comparación porcentual de emisiones horarias y anuales desde fuentes industriales en la comuna de Pudahuel..... | 72 |
| Figura 5-45 Ciclo diario flujo normalizado a hora punta en sector 5 para: a) camiones pesados y b) buses licitados..... | 73 |
| Figura 5-46 Aporte de principales fuentes en los niveles de MP10 | 75 |
| Figura 5-47 Porcentaje promedio de aporte de fuentes de material particulado en fracciones fina y gruesa de concentraciones de MP10. Campaña realizada en el invierno de 1998 en la estación Pudahuel de la red MACAM2 | 76 |
| Figura 5-48 Comparación de concentraciones de elementos químicos entre días buenos y días de episodio para fracción fina en estación Pudahuel, Invierno 1998..... | 77 |
| Figura 5-49 Comparación de concentraciones de elementos químicos entre días buenos y días episodios para fracción gruesa en estación Pudahuel, Invierno 1998..... | 77 |
| Figura 5-50 Aporte promedio de principales fuentes en fracción fina de concentraciones de MP10 en estación Pudahuel para días buenos y días de episodio, Invierno 1998 .. | 78 |
| Figura 5-51 Aporte promedio de principales fuentes en fracción gruesa de concentraciones de MP10 en estación Pudahuel para días buenos y días de episodio, Invierno 1998..... | 79 |
| Figura 5-52 Comparación de concentraciones de elementos entre días sobre el nivel de la norma y días bajo $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fracción fina en estación Pudahuel, Campaña 2005..... | 79 |
| Figura 5-53 Comparación de concentraciones de elementos entre días sobre el nivel de la norma y días bajo $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fracción gruesa en estación Pudahuel, Campaña 2005 | 80 |
| Figura 5-54 Relación concentración de MP10 entre días de episodios y días buenos para fracciones fina y gruesa en estación Pudahuel, campaña 1998 | 80 |
| Figura 5-55 Relación concentración de MP10 entre días de episodios y días buenos para fracciones fina y gruesa en estación Pudahuel, campaña 2005 | 81 |
| Figura 5-56 Desfase entre registros horarios de MP10 e ICAP, episodio 26 de mayo de 2006. 86 | 86 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 3-1 Estimación de la producción global de partículas (millones de toneladas) a partir de fuentes naturales | 5 |
| Cuadro 3-2 Estimación de la producción global de partículas (millones de toneladas) a partir de fuentes antropogénicas | 5 |
| Cuadro 3-3 Valores guías y niveles recomendados por OMS para promedios anuales de MP10 y MP2,5 | 10 |
| Cuadro 3-4 Valores guías y niveles recomendados por OMS para promedios de 24 horas de MP10 y MP2,5 | 11 |
| Cuadro 3-5 Categorías de ICAP y su calificación de efectos en salud | 17 |
| Cuadro 3-6 Principales medidas de PPDA 2004 | 19 |
| Cuadro 3-7 Inventario de emisiones anual, escenario 2005 real, Región Metropolitana..... | 21 |
| Cuadro 3-8 Inventario de emisiones anuales de material particulado, escenario 2005 real, Región Metropolitana..... | 21 |
| Cuadro 5-1 Mayores episodios de MP10 entre años 2004 y 2007 en Pudahuel..... | 43 |
| Cuadro 5-2 Distribución de episodios según el tipo de día de la semana | 46 |
| Cuadro 5-3 Concentraciones promedio de MP10 en estación Pudahuel y tipo de episodio para los días muestreados durante el período 10 de julio a 1 de septiembre de 2003..... | 49 |
| Cuadro 5-4 Concentraciones promedios de MP10 en estaciones Pudahuel y Cerro Navia entre el 10 julio y el 1 de septiembre de 2003..... | 50 |
| Cuadro 5-5 Coeficiente correlación entre estación Pudahuel y resto de estaciones de la red MACAM2 durante 50 episodios tipo A..... | 56 |
| Cuadro 5-6 Resumen del análisis estadístico descriptivo de la velocidad del viento para los días de episodios tipo A y tipo BPF, años 2004 a 2007 | 58 |
| Cuadro 5-7 Resultados los test estadísticos para la velocidad del viento durante 50 días de episodio tipo A, años 2004 a 2007 | 59 |
| Cuadro 5-8 Resultados de los test estadísticos para la velocidad del viento durante 38 días de episodio tipo BPF, años 2004 a 2007..... | 59 |
| Cuadro 5-9 Matriz de correlación entre la velocidad del viento en Pudahuel y el resto de las estaciones de la red MACAM2 para los 50 días de episodios tipo A y 38 BPF, años 2004 a 2007..... | 60 |
| Cuadro 5-10 Comparación de emisiones de MP10 desde fuentes móviles e industrias para Pudahuel y Región Metropolitana..... | 70 |
| Cuadro 5-11 Emisiones de MP10 desde categorías de fuentes industriales de la comuna de Pudahuel..... | 71 |
| Cuadro 5-12 Medidas de control y reducción de emisiones para sector transporte con probable impacto en Pudahuel..... | 83 |
| Cuadro 5-13 Medidas de control y reducción de emisiones para el sector industrial y otras fuentes con impacto en Pudahuel | 84 |
| Cuadro 5-14 Medidas especiales durante episodios críticos por MP10 con impacto en Pudahuel..... | 85 |

1 Introducción

Desde hace décadas la ciudad de Santiago experimenta un alto grado de contaminación atmosférica por material particulado en la época de otoño-invierno; incluso, durante algunos días llamados “episodios” se superan valores fijados en las normas chilenas de calidad de aire para MP10, alcanzando concentraciones consideradas peligrosas para la salud de las personas, especialmente niños y ancianos. Por este motivo, diversas publicaciones, ubican a Santiago entre las capitales más contaminadas del mundo (Bell *et al.*, 2006; Molina y Molina, 2004; Rappengluck *et al.* 2005; Morata *et al.*, 2007; Grass y Cane, 2007).

Los altos niveles de contaminación atmosférica en Santiago obedecen a la conjunción de varios factores: a) la creciente actividad económica de la región que lleva aparejada elevados niveles de emisión de contaminantes a la cual se suman condiciones urbanas propias de la ciudad; b) la gran extensión y segregación funcional que provocan un progresivo deterioro del transporte, con aumentos de las distancias recorridas, de los tiempos de viaje y de los flujos; c) las condiciones geográficas y meteorológicas de la Región Metropolitana que son particularmente desfavorables para una adecuada dispersión de contaminantes (CONAMA, 1997; CONAMA 2008).

De acuerdo al último inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos (DICTUC, 2007) las principales fuentes emisoras de partículas en Santiago son: procesos industriales, combustión en calderas, emisiones vehiculares, polvo resuspendido desde el suelo, uso de chimeneas domiciliarias a leña y quemas agrícolas. Existe, además, una fracción significativa del material particulado atmosférico, correspondiente a nitratos, sulfato y amonio que se forman por transformación gas-partícula dando origen a lo que se conoce como aerosol secundario (Morata *et al.*, 2007).

La composición química de las partículas es muy heterogénea. Las partículas con diámetro inferior a 10 μm (denominadas MP10) son dañinas para la salud humana, ya que pueden penetrar en las vías respiratorias. La fracción fina del MP10 (partículas con diámetro menor a 2,5 μm denominadas MP2,5) es de mayor peligrosidad al ser 100% respirables, penetrar y permanecer mayor tiempo en los pulmones; además, en general su composición química es de mayor toxicidad (Préndez, 1993; US EPA, 2004).

Aumento de la frecuencia de infecciones respiratorias agudas, cáncer pulmonar y muertes prematuras son los principales efectos en salud vinculados a la exposición prolongada a material particulado respirable (Ostro *et al.*, 1996; Ostro *et al.*, 1999; Ilabaca *et*

al., 1999; Cifuentes *et al.*, 2000; Pino *et al.*, 2004; Matus, 2009). Además de los efectos en salud, otros efectos comprobados de la contaminación por material particulado son la reducción de visibilidad, el ensuciamiento de fachadas de edificios y vestimentas, los problemas potenciales de depositación de polvo y lluvia ácida (US EPA, 2004).

Desde 1997, se ha implementado en la Región Metropolitana un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) el cual contempla una serie de medidas destinadas a reducir los niveles de material particulado y gases contaminantes (CONAMA, 1997; CONAMA, 2001; CONAMA 2008). Sin embargo, en el período 1997-2008, se registraron 370 días en los cuales se superaron los niveles de Alerta o Pre-Emergencia por contaminación por material particulado respirable (MP10) respecto a la norma diaria. En la mayoría de esos días la estación de monitoreo ubicada en la comuna de Pudahuel presentó valores más altos, definiendo la condición relevante para la adopción de medidas de control de emisiones y restricciones al funcionamiento de fuentes fijas y móviles.

A pesar de los avances en la disminución de los niveles de MP10 respecto al año 1997, el problema no ha sido resuelto en los plazos establecidos en el PPDA; incluso durante los últimos años, producto de la crisis energética, las concentraciones han registrado un aumento tanto en los promedios anuales como en el número de episodios de contaminación durante el período de otoño-invierno.

El desarrollo de programas de control y reducción de la contaminación atmosférica por partículas requiere identificar los responsables y su contribución en las concentraciones ambientales para diseñar y aplicar medidas eficaces y eficientes en corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, para determinar la responsabilidad o participación de los distintos sectores emisores de material particulado no existe un método directo, ya que la relación entre los contaminantes emitidos a la atmósfera (emisión) y las concentraciones medidas en el aire no tiene un comportamiento lineal. A la fecha no se ha evaluado en forma convincente la efectividad de las medidas tomadas y no se han identificado medidas de control enfocadas a disminuir la contaminación en el área más afectada de la ciudad, Pudahuel.

El objetivo principal del presente estudio es contribuir al mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad de Santiago, identificando las causas que originan los altos niveles de contaminación por MP10 en la comuna de Pudahuel a fin de contribuir al mejoramiento de la gestión de la calidad del aire y disminuir las concentraciones máximas observadas en esa zona de la ciudad.

2 Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis

Si los factores que determinan los niveles de MP10, son los mismos a nivel de la cuenca que en el área de Pudahuel, entonces sus altos niveles de MP10 están determinados por cambios en los valores de parámetros específicos. Luego, si existen diferencias entre áreas de Santiago, las propuestas para mejorar la calidad del aire, debieran enfocarse tanto en la gestión regional como en la gestión local.

2.2 Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal del presente estudio es estudiar los factores que originan los altos niveles de contaminación por MP10 en la comuna de Pudahuel, a fin de contribuir al mejoramiento de la gestión de su calidad del aire, disminuir las concentraciones máximas observadas en esa zona de la ciudad y contribuir al mejoramiento de la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Santiago.

Objetivos específicos

1. Analizar la información disponible de MP10 desde 1997 para estudiar el comportamiento de los contaminantes durante episodios y la ocurrencia de concentraciones máximas en el sector de Pudahuel.
2. Estudiar la extensión geográfica del área de concentraciones elevadas durante episodios de contaminación atmosférica en la zona de Pudahuel para identificar la(s) zona(s) de mayor concentración de MP10.
3. Estudiar los flujos de aire locales para establecer las zonas de origen de masas de aire contaminado que llegan al sector de Pudahuel durante episodios de contaminación atmosférica.
4. Identificar las fuentes emisoras de MP10 que influyen sobre el sector de Pudahuel para estimar las emisiones desde fuentes emisoras relevantes y su aporte a las concentraciones observadas de MP10.

3 Marco Teórico

3.1 Origen, tamaño y distribución del material particulado en la atmósfera

El material particulado atmosférico se origina de una variedad de fuentes y posee un amplio rango de propiedades químicas, físicas y termodinámicas; ellas se forman mediante subdivisiones o roturas de fragmentos mayores de materia y/o por aglomeración de fragmentos pequeños incluyendo moléculas (Hidy y Brock, 1971; Jaenicke, 1980; Prospero y Charlson, 1983; Stocker y Seager, 1981, Ondov y Wexler, 1998).

Las partículas se clasifican en primarias y secundarias según la fuente que las origina. Las primarias son aquellas emitidas directamente por las fuentes bajo forma de partícula, tales como el polvo en suspensión o las partículas de humo emitidas por una chimenea. Las secundarias son aquellas producidas en la misma atmósfera a causa, por ejemplo, de reacciones químicas en fase gaseosa que producen especies capaces de condensarse. Las partículas primarias son de todos los tamaños, en cambio las secundarias son en general partículas muy pequeñas (US EPA, 2004).

La formación de partículas secundarias se realiza principalmente a partir de los tres procesos siguientes:

- Coagulación: proceso por el cual las partículas colisionan entre sí debido a su movimiento relativo, adhiriéndose para formar partículas más grandes.
- Nucleación a partir de vapor sobresaturado con la presencia de un núcleo de condensación (heterogénea) o no (homogénea).
- Condensación simultánea (proceso cinético de nucleación heterogénea) o consecutivo (difusión, inercial, difusoforético o electrostático).

Las partículas también se clasifican de acuerdo a su origen, ya sea natural o antrópico. Las fuentes naturales primarias más importantes son: el polvo levantado por el viento, el aerosol marino, las emisiones volcánicas, los incendios de bosques y matorrales. Las fuentes naturales secundarias incluyen sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos (US EPA, 2004).

Métodos para estimar la contribución específica de fuentes a las concentraciones de material particulado han sido revisados en detalle por Brook *et al.* (2004) y Watson *et al.* (2002). Aunque el impacto específico de fuentes difiere entre regiones, el análisis sugiere que en los países desarrollados, sobre un 67% del MP_{2,5} es producto de fuentes antropogénicas. Las principales categorías de fuentes incluyen combustión de combustibles fósiles (motores de combustión interna, plantas eléctricas), quema de biomasa (quema residencial de leña,

incendios forestales y quemas agrícolas) y emisiones de amonio desde actividades agrícolas (OMS, 2005).

Estudios realizados a comienzos de la década de los setenta estimaron la producción global anual de partículas, tanto por fuentes naturales como antropógenicas. Entre estos estudios destacan los realizados por Petersen y Junge (1971), Hidy y Brock (1971) y el estudio "Impacto del Hombre en el Clima", SMIC por sus siglas en inglés (Prospero *et al.*, 1983), los cuales se resumen en los Cuadros 3-1 y 3-2.

Cuadro 3-1 Estimación de la producción global de partículas (millones de toneladas) a partir de fuentes naturales

| Fuente | Petersen y Junge, 1971 | | Hidy y Brock, 1971 | Prospero <i>et al.</i> , 1983 |
|------------------------------|------------------------|-------------|--------------------|-------------------------------|
| | Conjunto | 2,5 µm | | |
| Emisiones directas | | | | |
| Sal Marina | 1000 | 500 | 1095 | 300 |
| Minerales | 500 | 500 | 7 - 365 | 100 - 500 |
| Volcanes | 25 | 25 | 4 | 25 - 150 |
| Quemas bosques y veg. | 35 | 5 | 146 | 3 - 150 |
| Meteoritos | 10 | - | 0,02 - 0,2 | - |
| Subtotal | 1580 | 780 | 1610 | 428 - 1100 |
| Emisiones secundarias | | | | |
| Sulfato | 244 | 220 | 36 - 365 | 130 - 200 |
| Nitrato | 75 | 60 | 600 - 620 | |
| Hidrocarburos | 75 | 75 | 182 - 1095 | 75 - 200 |
| Subtotal | 394 | 355 | 2080 | 345 - 1100 |
| Total | 1964 | 1135 | 3690 | 773 - 2200 |

Cuadro 3-2 Estimación de la producción global de partículas (millones de toneladas) a partir de fuentes antropógenicas

| Fuente | Petersen y Junge, 1971 | | Hidy y Brock, 1971 | Prospero <i>et al.</i> , 1983 |
|------------------------------|------------------------|-------------|--------------------|-------------------------------|
| | Conjunto | 2,5 µm | | |
| Emisiones directas | | | | |
| Transporte | 2,2 | 1,8 | | |
| Fijas | 43,4 | 9,6 | | |
| Industria | 56,4 | 12,4 | | |
| Residuos sólidos | 2,4 | 0,4 | | |
| Otras | 28,8 | 5,4 | | |
| Subtotal | 133,2 | 29,6 | 36 - 110 | 10 - 90 |
| Emisiones secundarias | | | | |
| Sulfato | 220 | 200 | 109,5 | 130 - 200 |
| Nitrato | 40 | 35 | 23 | 30 - 35 |
| Hidrocarburos | 15 | 15 | 27 | 15 - 90 |
| Subtotal | 275 | 250 | 159 | 175 - 325 |
| Total | 2372 | 1415 | 3959 | 958 - 2615 |

El tamaño del material particulado es un parámetro muy importante en la determinación de efectos, tasa de depositación, tiempo de residencia en la atmósfera y destino de las partículas atmosféricas. Además, el tamaño de las partículas tiene gran relevancia en sus propiedades, en el comportamiento en la atmósfera y en las posibilidades de ser inhalada o capturada en los sistemas o equipos diseñados para su estudio.

La morfología y tamaño de las partículas varía ampliamente dependiendo principalmente de su origen (natural o antrópico) y la fase en que se presenta. Cuando las partículas están en fase líquida la forma es esférica. En cambio, las partículas sólidas poseen gran variedad de formas, a veces esféricas, rectangulares, aciculares, astilladas, etc. (US EPA, 2004).

Con el propósito de estudiar el comportamiento aerodinámico de las partículas se define un diámetro aerodinámico equivalente como: “el diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm^3 con la misma velocidad de depositación que la partícula real debido a fuerzas gravitacionales en aire estable, bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa” (Hinds, 1982). En función de este criterio, cualquier partícula, independiente de su forma, es equivalente al diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm^3 de idéntica velocidad de caída.

Para las partículas inferiores a $0,5\mu\text{m}$ se utiliza el término diámetro de difusión, definido como el diámetro de una esfera de idéntico coeficiente de difusión que la partícula real bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa.

Los investigadores de aerosoles utilizan varias aproximaciones o convenciones para clasificar las partículas, las cuales incluyen:

- Modal, clasifica las partículas en función de la distribución de tamaños y de los mecanismos de formación en modo grueso, modo fino, modo de acumulación y modo de nucleación
- Dosimetría, clasifica las partículas según el grado de penetración en el sistema respiratorio en partículas inhalables, torácicas y respirables.
- Punto de corte, de acuerdo al diámetro de las partículas para especificar los equipos de muestreo o captadores de éstas; se habla de partículas totales en suspensión (PTS), partículas respirables menores a 10 micrones (MP10), partículas finas (MP2,5), etc (US EPA, 2004).

En 1987, en Estados Unidos la NAAQS (National Atmospheric Air Quality Standard) decidió utilizar MP10 como un indicador para norma de calidad de aire por material particulado respirable (Federal Register, 1987).

Mientras que nuevas partículas se crean y modifican continuamente, las partículas existentes en el aerosol son continuamente removidas por una amplia variedad de procesos húmedos y secos, cuya eficiencia varía en función de su tamaño. De estos procesos depende el tiempo de residencia en la atmósfera. Estimaciones realizadas por Jaenicke (1980), determinan que para partículas en el rango de 0,1 - 10 μm el tiempo de residencia en la atmósfera es cercano a una semana, en cambio en la estratósfera es de meses a años. El aumento de la duración del tiempo en función de la altura se debe en gran medida a la distribución de vapor de agua y a la distribución vertical de un número importante de especies reactivas (fotoquímicamente producidas) entre otras: ozono y radicales hidróxido.

Los principales componentes del material particulado atmosférico (MP) son sulfato, nitrato, amonio, ión hidrógeno, agua adherida a las partículas, carbono elemental, una gran variedad de compuestos orgánicos, aerosol marino y elementos. La mayoría de los estudios de especiación química del MP evidencian una dependencia entre composición química y tamaño de las partículas (US EPA, 1996a). La distribución o clasificación en orden de importancia o participación de los componentes del material particulado depende fuertemente de la localidad. Al respecto, estudios realizados en gran parte de Estados Unidos indican que sulfato, amonio, ión hidrógeno, carbón elemental, componentes orgánicos secundarios, especies orgánicas primarias de quemaduras y combustión y ciertos metales de transición están predominantes en la fracción fina del MP. Elementos de la corteza como calcio, aluminio, sílice, magnesio, hierro y materia orgánica (polen, esporas, restos de plantas y animales) son predominantes en la fracción gruesa del MP. Algunos compuestos, entre ellos nitrato y potasio, se pueden encontrar en ambas fracciones, pero se originan en diferentes fuentes. Por ejemplo, potasio en fracción gruesa proviene del suelo y en la fracción fina proviene principalmente de quemadura de leña (US EPA, 2004). Las fuentes o procesos antropogénicos emisores de partículas que involucran combustión tienen un predominio de la fracción fina (partículas menores a 2,5 micrones), en cambio las emisiones asociadas a fuentes naturales tienen un predominio de la fracción gruesa.

3.2 Efectos del material particulado sobre la salud humana

El estudio de los episodios de elevada contaminación atmosférica en el Valle Meuse (Bélgica) en 1930, Donora (Pensilvania) en 1948 y Londres en 1952 han sido las primeras fuentes documentadas que relacionaron mortalidad con contaminación por partículas (Préndez, 1993).

Avances en la investigación de los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de las personas, han determinado que los riesgos a la salud son causados por partículas inhalables, en función de la penetración y depositación de éstas en diferentes secciones del aparato respiratorio, y la respuesta biológica a los materiales depositados.

Las partículas más gruesas, sobre $5\ \mu\text{m}$ son filtradas por la acción conjunta de los cilios del conducto nasal y la mucosa que cubre la cavidad nasal y la tráquea. Las partículas de diámetro entre $0,5$ y $5\ \mu\text{m}$ pueden depositarse en los bronquios e incluso en los alvéolos pulmonares, sin embargo, son eliminadas por los cilios de bronquios y bronquiolos al cabo de algunas horas. Las partículas menores a $0,5\ \mu\text{m}$ pueden penetrar profundamente hasta depositarse en los alvéolos pulmonares, permaneciendo desde semanas a años, puesto que no existe un mecanismo mucociliar de transporte que facilite la eliminación (Préndez, 1993). La figura siguiente muestra la penetración de las partículas en el sistema respiratorio dependiendo de su tamaño.

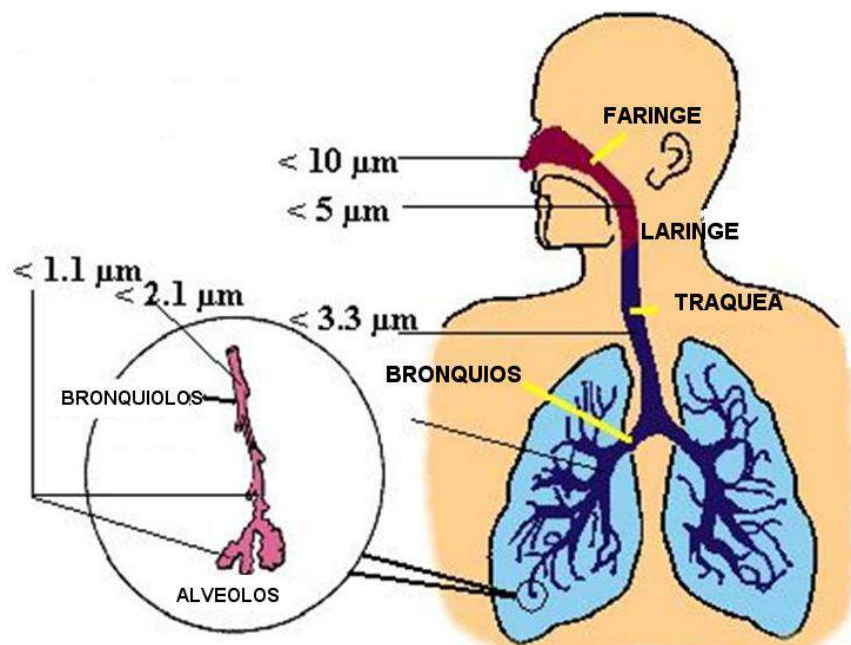


Figura 3-1 Penetración de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio

Fuente: Elaborado a partir de información de USEPA, 1996

Las partículas que entran y permanecen en los pulmones pueden ocasionar diversos efectos adversos para la salud de las personas, entre ellos:

- Interferencia con los mecanismos de limpieza del tracto respiratorio, impidiendo o retrasando la eliminación de partículas nocivas.
- Irritabilidad de áreas sensibles de los pulmones
- Generación de procesos cancerígenos por efectos de partículas altamente tóxicas ante la exposición permanente (Stocker, 1981).

Estudios experimentales desarrollados en Chile a comienzos de los 90s por Gil (1991) y epidemiológicos realizados por Belmar (1990) y Oyanguren (1992) asociaron la contaminación atmosférica de Santiago a diversas alteraciones de la salud de las personas, concluyendo que es muy difícil aislar los diferentes contaminantes de la atmósfera y medir sus efectos en salud.

Dockery (1993) determinó que por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10 las admisiones hospitalarias por causas respiratorias aumentan en 0,8%, las atenciones de urgencia en 1,0% y las consultas de urgencia por ataques asmáticos en 3,4%.

Estudios realizados en Santiago de Chile a fines de los 90s, coherentes con investigaciones realizadas en diferentes países, identificaron una asociación significativa y consistente entre contaminación MP10 y mortalidad prematura (Ostro *et al.*, 1996; Cifuentes *et al.*, 2000); además, identificaron una contribución de la contaminación del aire al aumento de enfermedades respiratorias en niños (Ostro *et al.*, 1999; Ilabaca *et al.*, 1999; Sanhueza *et al.*, 1999, Cifuentes *et al.*, 2000; Pino *et al.*, 2004). Ostro *et al.* (1996) establecieron un incremento del 4% de riesgo de morir asociado al nivel de $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10; Ostro *et al.* (1999) encontraron que las consultas por enfermedad respiratoria aguda aumentaban entre un 4 y 12% con $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10; Ilabaca (1999) estableció que incrementos de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP2,5 se asociaron a un incremento de 2,7% en atenciones respiratorias y 6,7% de neumonías. Sanhueza *et al.* (1999) establecieron por cada $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10 un aumento de riesgo relativo a muertes de 2,5% por enfermedades cardiovasculares y 6,1% por enfermedades respiratorias en niños menores de 1 año y adultos mayores de 65 años. Estudios en los últimos años han coincidido con el diagnóstico de los años 90s, pero difieren en las cifras. Cifuentes (2000) encontró un 4,2% de mortalidad por $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP2,5; Pino *et al.* (2004) establecieron, con un estudio de cohortes, un 5% de bronquitis obstructiva por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP2,5; Cakmak (2007) estableció un 4,53% de probabilidad de morir para $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10 en adultos menores de 65 años y un 9,47% en mayores de 65 años.

Otros estudios de exposiciones agudas a MP10 realizados en 29 ciudades de Europa (Katsouyanni *et al.*, 2001) y en 20 ciudades de Estados Unidos (Samel *et al.*, 2000) han informado aumentos de mortalidad por exposición a MP10 de 0,62% y 0,46%, respectivamente por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por sobre el valor de la norma anual fijado en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estudios similares en ciudades de Asia han informado efectos de 0,49% (HEI International Oversight Comité, 2004). Por lo tanto, una concentración de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ podría relacionarse con un aumento de 5% en la mortalidad diaria (OMS, 2005).

La OMS, 2005 ante la evidencia y consistencia de estudios de salud pública y efectos en la población urbana expuesta a concentraciones de material particulado, estableció valores guías por sobre los cuales se han observado significativos efectos en la salud de las personas.

Considerando la realidad de los países y la necesidad de establecer metas graduales la OMS ha recomendado niveles intermedios para promedios diarios y anuales de MP10 y MP2,5 asociándoles porcentajes de aumento en las tasas de mortalidad (OMS, 2005); estos niveles se presentan en los cuadros 3-3 y 3-4. En Chile, el DS59/1998 establece el valor 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite para el percentil 98 de las concentraciones diarias de MP10 durante un año; para concentraciones tri-anales el DS45/2001 establece el valor 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cuadro 3-3 Valores guías y niveles recomendados por OMS para promedios anuales de MP10 y MP2,5

| Promedio Anual recomendado | MP10 | MP2,5 | Observaciones |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | |
| OMS Nivel 1 | 70 | 35 | A estos niveles se asocia un 15% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS |
| OMS Nivel 2 | 50 | 25 | A estos niveles se asocia un 9% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS |
| OMS Nivel 3 | 30 | 15 | A estos niveles se asocia entre un 3% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS |
| Valor guía OMS | 20 | 10 | Valores mínimos registrados donde la mortalidad por cáncer al pulmón y enfermedades Cardiopulmonares no presentan un aumento (con un 95% de confiabilidad). |

Fuente (OMS, 2005)

La mayoría de los estudios epidemiológicos utilizan MP10 como indicador dado que el monitoreo de calidad de aire principalmente está basado en mediciones de MP10, pero existen diferencias entre el particulado fino y grueso del MP10 lo cual justifica establecer un indicador basado en MP2,5 dado que estas partículas serían más dañinas para la salud. La OMS estableció en el año 2005 el valor 0,5 para la relación MP2,5/MP10 basado en un gran número de estudios realizados en áreas urbanas que encontraron valores para esta relación entre 0,5 y 0,8.

Cuadro 3-4 Valores guías y niveles recomendados por OMS para promedios de 24 horas de MP10 y MP2,5

| Promedio diario recomendado | MP10 | MP2,5 | Observaciones |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | |
| OMS Nivel 1 | 150 | 75 | A estos niveles se asocia un 5% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS |
| OMS Nivel 2 | 100 | 50 | A estos niveles se asocia un 2,5% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS |
| OMS Nivel 3 | 75 | 37,5 | A estos niveles se asocia entre un 1,2% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS |
| Valor guía OMS | 50 | 25 | Valores mínimos registrados donde la mortalidad diaria por enfermedades Cardiopulmonares y cáncer al pulmón no presentan un aumento (con un 95% de confiabilidad), en base al promedio anual. |

Fuente (OMS, 2005)

3.3 Aspectos meteorológicos de la Región Metropolitana

La Región Metropolitana (33,5°S, 70,8°W) se ubica entre las cordilleras de Los Andes y de la Costa. Predominan los relieves montañosos que encierran hacia el centro de la región una amplia y extensa cuenca aérea, la de Santiago. Por el norte, el cordón montañoso de Chacabuco la separa de la región de Valparaíso y por el sur, los cerros de Angostura y Chada constituyen el límite con la Sexta Región. La gran cantidad de cerros que rodean la planicie central, dificultan la circulación de vientos y la renovación del aire al interior de la cuenca.

Desde la década de los 60s se han realizado mediciones experimentales y estudios de los factores meteorológicos en Santiago, principalmente por el grupo de meteorología de la Escuela de Ingeniería de la U. de Chile (Fuenzalida 1961, Rutllant 1973, Ulriksen 1980, Rutllant y Salinas 1983, Ulriksen *et al.* 1992, Rutllant *et al.* 1993). De estos trabajos proviene la mayor parte del conocimiento actual sobre el comportamiento del aire en la cuenca y las características de algunos fenómenos meteorológicos, tales como los flujos atmosféricos, la ocurrencia de capas de inversión térmica y las características meteorológicas asociadas a episodios de contaminación.

Durante el período otoño-invierno las características topoclimáticas de la cuenca de Santiago presentan en general, condiciones desfavorables para la dispersión de contaminantes, lo que se ve potenciado por su topografía. Debido al predominio de las condiciones anticiclónicas en la región, el forzamiento del flujo de aire por los sistemas meteorológicos de gran escala es débil y la ventilación de la cuenca se produce principalmente por un sistema de brisas generadas localmente por el calentamiento radiativo de la superficie. Por este motivo, entre abril y agosto, el flujo de aire dentro de la cuenca es mucho más débil que en verano,

debido a la menor disponibilidad de radiación solar (Ulriksen, 1993). Las figuras 3-2 y 3-3 ilustran el patrón de flujos de vientos en la Región Metropolitana para tardes y noches de invierno y verano, respectivamente:

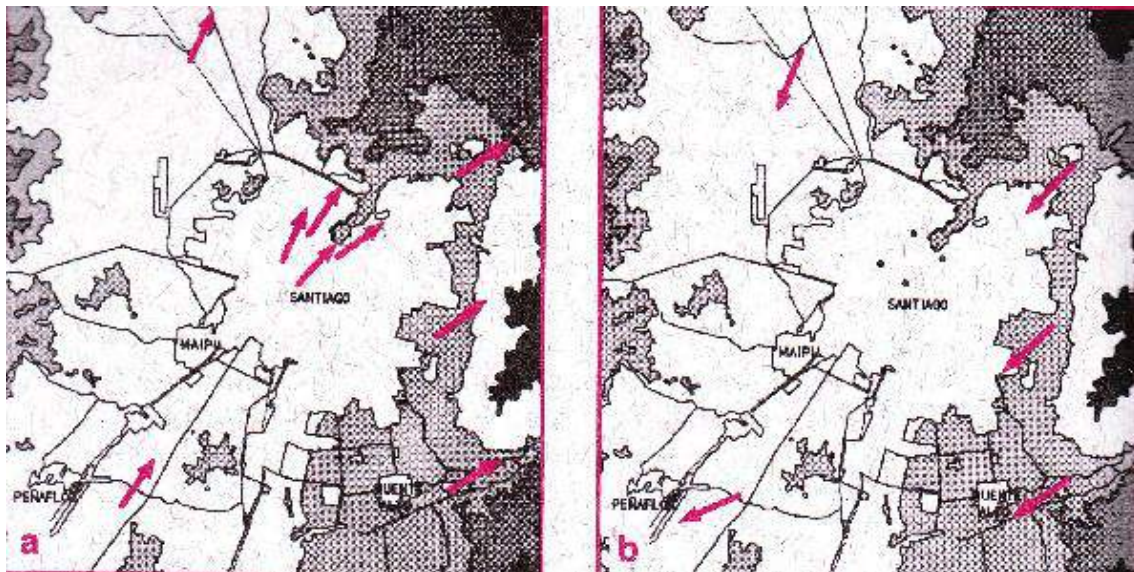


Figura 3-2 Patrón de vientos durante tardes y noches de invierno

Fuente: (Ulriksen, 1993)

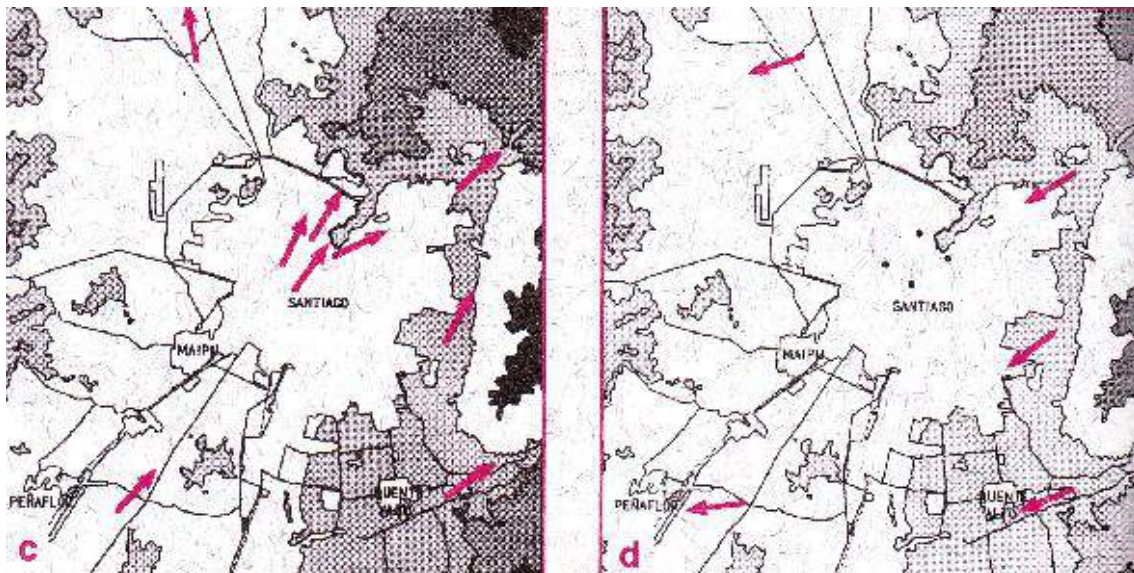


Figura 3-3 Patrón de vientos durante tardes y noches de verano

Fuente: (Ulriksen, 1993)

Se han tipificado dos configuraciones meteorológicas asociadas a los días con altas concentraciones de MP10, las cuales se denominaron episodios tipo A y tipo BPF (Rutllant y Garreaud, 1995; Rutllant y Garreaud, 2004; Garreaud *et al.*, 2002; Garreaud y Rutllant, 2003). La condición Tipo A está caracterizada por la irrupción de una dorsal en la tropósfera media

(500 hPa) como elemento forzante a escala sinóptica y la formación y propagación a niveles bajos desde el Norte Chico hacia la Zona Central de una vaguada o baja costera. Esta baja costera se observa ubicada en los mapas sinópticos entre la alta subtropical por el oeste y una alta fría migratoria al este de la Cordillera de Los Andes que se desplaza hacia el Atlántico siguiendo el paso de un sistema frontal. La baja costera produce subsidencia forzada en la ladera andina occidental y vientos descendentes de componente Este determinados por la convergencia superficial. En el sector delantero o borde sur de la baja costera se presentan cielos despejados, anomalías negativas de la humedad relativa y anomalías positivas de la temperatura, intensificación de la inversión térmica de subsidencia, reducción de la capa de mezcla superficial, bajo factor de ventilación y malas condiciones de dispersión. En la etapa de disipación de la baja costera, se presenta el ascenso de la base de la inversión de subsidencia, vientos de componente oeste asociados a advección de aire costero, aumento de la capa de mezcla superficial y del factor de ventilación y mejoramiento de las condiciones de dispersión. La Figura 3-4 a) ilustra el comportamiento meteorológico durante esta configuración

La condición tipo BPF se caracteriza normalmente por la irrupción de una vaguada en la troposfera media (500hPa) que acompaña a un sistema frontal de lento desplazamiento, asociando abundante cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta. Esto produce una oscilación térmica diaria en superficie débil y contribuye a que se presente un bajo factor de ventilación. En ocasiones una proyección frontal cálida asociada a la parte delantera de una dorsal en altura, o una corriente en chorro intensa que genere abundante nubosidad media y alta pueden producir un efecto similar. La Figura 3-4 b) ilustra el comportamiento meteorológico durante dicha configuración. Cuando se alternan los episodios de tipo A y de tipo BPF con períodos intermedios del orden de 24 horas, se habla de episodios múltiples o mixtos.

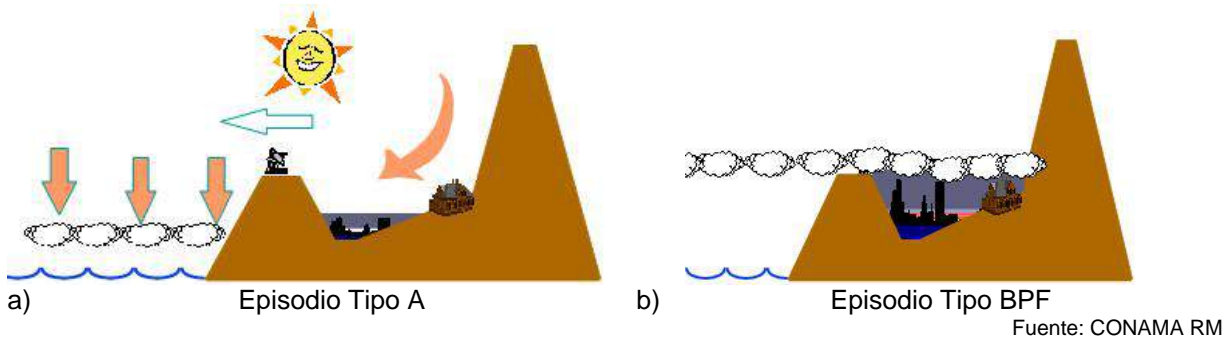
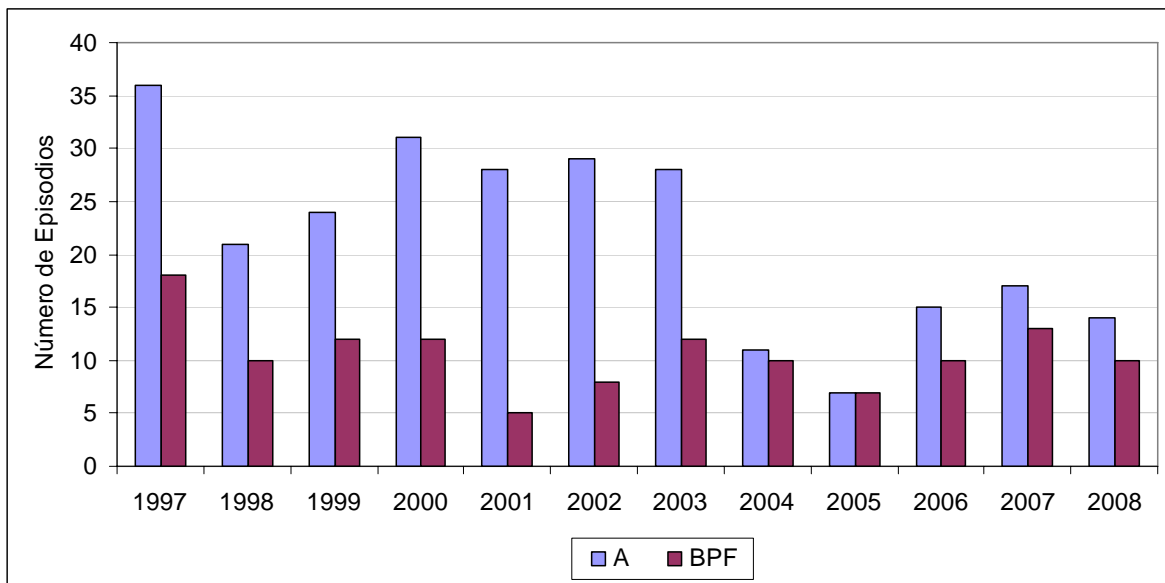


Figura 3-4 Esquema de episodios Tipo A y Tipo BPF

Durante días de episodio, los niveles de MP10 aumentan significativamente en las estaciones de monitoreo de calidad de aire en Santiago. En los episodios tipo A, la estación de monitoreo Pudahuel ubicada en la zona norponiente de la ciudad presenta usualmente concentraciones de MP10 más altas que el resto de las estaciones de monitoreo. En episodios

tipo BPF, en cambio, con flujo débil del noroeste, las concentraciones máximas suelen observarse en el sector surponiente de la ciudad (estaciones La Florida y El Bosque).

La Figura 3-5 muestra la evolución de la cantidad de episodios asociados a configuraciones tipo A y BPF que se presentaron en la Región Metropolitana entre los años 1997 y 2008. El número de episodios tipo A, excepto en el año 2005, ha sido mayor a los episodios tipo BPF, con una mayor diferencia entre los años 1997 a 2003.



Fuente: (CENMA, 2008)

Figura 3-5 Cantidad de episodios Tipo A y BPF identificados en la Región Metropolitana, período 1997 a 2008

La Figura 3-6 muestra una clasificación de episodios según Muñoz *et al.* (2003), separando los ocurridos entre los años 2001 y 2003 en “episodios tempranos”, que son aquéllos con máximos entre las 21 y 22h, y “episodios tardíos” que son aquéllos ocurridos durante las primeras horas de la madrugada del día siguiente. El estudio concluye que existen condiciones meteorológicas distintas para cada tipo de episodio, donde en promedio los episodios tardíos corresponden a días con gran estabilidad térmica, temperaturas máximas diarias más altas y mayores concentraciones de MP10.

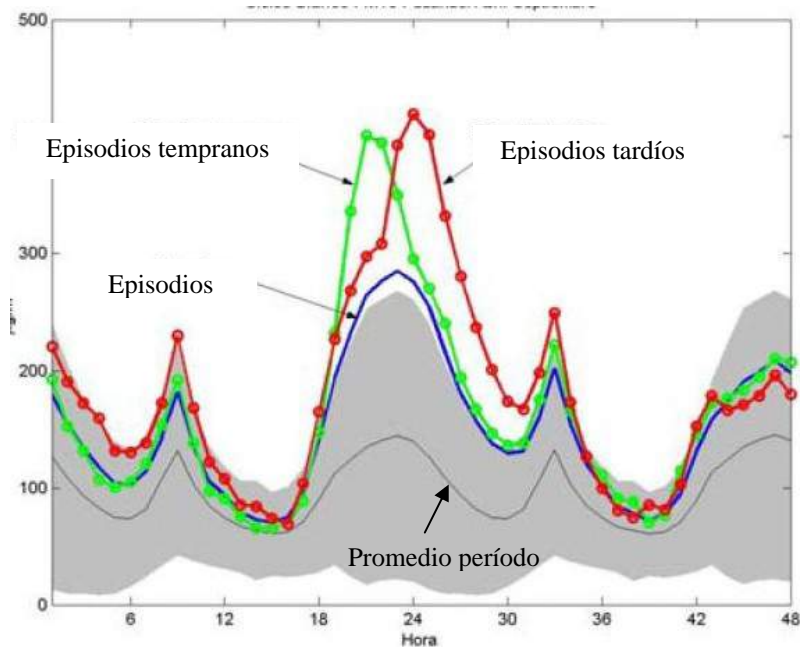


Figura 3-6 Ciclos diarios para todos los días y su variabilidad (sombreada). Ciclos diarios para días de episodios (azul), episodios tempranos (verde) y episodios tardíos (rojo), 2001-2003.

3.4 Gestión de la calidad de aire en la Región Metropolitana

Durante los años sesenta, principalmente en el mundo académico, se comenzó a estudiar el fenómeno de enrarecimiento del aire de Santiago y sus efectos en la salud de la población.

En el año 1961 el Ministerio de Salud (MINSAL) promulgó el DS 141 que establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquiera naturaleza.

Las primeras mediciones sistemáticas para conocer los niveles de contaminación atmosférica de Santiago se realizaron en 1964 de acuerdo al diseño recomendado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS); mediante metodologías sencillas y de bajo costo se determinaron índice de acidez, índice de suciedad, polvo sedimentable e índice de corrosión (Ulriksen, 1993). En 1976 se instaló una "red de Vigilancia de Calidad del Aire", como parte del estudio "Programa de Contaminación Atmosférica en la Región Metropolitana. La red estaba constituida por una estación monitorea continua en el centro y estaciones de muestreo semiautomáticas ubicadas en anillos concéntricos al centro de la ciudad (Ulriksen, 1993).

Los primeros valores o Normas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica se establecieron en 1978 por MINSAL mediante la Resolución N° 1.215 que fijó, entre otros valores, un máximo de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones diarias y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio anual de partículas totales en suspensión.

En 1983, MINSAL estableció el Decreto N°279 para controlar las emisiones de los vehículos diesel y bencineros. En 1984 se adquirieron 10 equipos móviles para estudiar la emisión de monóxido de carbono de los vehículos, comenzando el control en febrero.

En febrero de 1986, el Ministerio de Transportes dictó las primeras medidas para combatir la contaminación en el centro de Santiago. Estas incluyeron: restricción vehicular, disminución del uso de calderas en edificios públicos, prohibición de demoliciones, clausura temporal de equipos o actividades infractoras. En marzo se restringió la circulación de autos para los días con índices de contaminación que sobrepasasen los niveles de tolerancia, estableciendo un 20% de restricción para días con condiciones malas y un 40% para condiciones muy malas. En diciembre, se estableció el retiro de circulación de todo vehículo que infringiera las normas (Alliende, 2004).

En abril 1987, por primera vez se aplicó la restricción vehicular, entre las 6:00 y las 22:00 horas (Alliende, 2004). En julio comenzó a funcionar la Red de Monitoreo Automática de Contaminantes Atmosféricos denominada red MACAM financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). La red estaba compuesta por 4 estaciones ubicadas en la zona céntrica de la capital (Av. La Paz, Plaza Gotuzzo, Providencia y Parque O'Higgins) y una quinta estación de tipo móvil, que fue emplazada en la comuna de Las Condes. La medición de MP10 se realizó con muestreadores gravimétricos los cuales captaban el MP10 en filtros instalados por períodos de 24 horas; posteriormente los filtros eran trasladados al laboratorio para determinar la masa acumulada conociéndose la concentración al menos 2 días después de la medición (ASRM, 2008).

En el año 1988, la Resolución 369 del Ministerio de Salud estableció el índice de calidad de aire por partículas (ICAP) en función de las concentraciones de 24h de MP10. Se fijó un ICAP=0 para $0 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, ICAP=100 para $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y un ICAP=500 para $330 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ variando linealmente entre los tramos; el valor 500 correspondería al valor límite por sobre el cual existiría riesgo para la población al exponerse a estas concentraciones. El Cuadro 3-5 presenta las categorías de ICAP y la calificación de los niveles de concentración de MP10 al cual se exponen las personas.

El 13 de junio de 1989, luego de registrarse índices de 750 para MP10, el gobierno dictó medidas de urgencia: restricción para el 50 % de la locomoción colectiva, 20 % de autos particulares y feriados escolares. Estableció que sobre el nivel 500, el mismo porcentaje de vehículos debía salir de circulación, paralizar las 50 industrias más contaminantes y prohibirse el uso de chimeneas particulares. Sobre los 650, el 50 % de los buses y el 20 % de los autos no podrían circular y se paralizarían 100 industrias y chimeneas particulares (QUE PASA, 1997).

Cuadro 3-5 Categorías de ICAP y su calificación de efectos en salud

| ICAP | Equivalencia en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Calificación |
|-----------|--|--------------|
| 0-100 | 0 - 149 | Bueno |
| 101 - 200 | 150 - 194 | Regular |
| 201 - 300 | 195 - 239 | Malo |
| 301 - 400 | 240 - 284 | Crítico |
| 401 - 500 | 285 - 330 | Peligroso |

Fuente: Resolución 369/1988 de MINSAL

En febrero de 1990 se promulgó el “Reglamento de funcionamiento de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos en situaciones de emergencia de contaminación atmosférica” (DS 32 de MINSAL) que establece la necesidad de un registro de fuentes emisoras y la obligatoriedad de ensayos isocinéticos para estimar las emisiones desde chimeneas. En abril se creó la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (DS 349 del Ministerio del Interior) que estableció un Plan Maestro de Descontaminación para la Región Metropolitana con 49 disposiciones: racionalización de estacionamientos en el centro, reubicación de parquímetros, estaciones de taxis y restricción de ingreso al centro para el 50 % de éstos, entre otras. Se estableció un plan de emergencia, cuando los índices superaran el nivel 500, que incluía restricción vehicular de un 40 %. En junio, el gobierno creó la Comisión Nacional del Medioambiente. La Resolución N 157 del MINTRATEL regula recorridos para la locomoción colectiva.

En 1991 el Ministerio de Transportes mediante el DS 211 estableció normas de emisión para vehículos livianos. Esta medida significó la prohibición de ingreso a la Región Metropolitana, Quinta y Sexta de vehículos nuevos sin convertidor catalítico. En 1994 la medida se amplió a todo el país. En octubre comenzó la licitación de recorridos de microbuses para el centro de Santiago (QUE PASA, 1997).

En enero 1992 el DS 4 del MINSAL estableció normas de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. Fijó un límite máximo de emisión de material particulado en 112 miligramos por metro cúbico (mg/m^3) y un programa de reducción de emisiones hasta $32 \text{ mg}/\text{m}^3$ a partir del 1º de enero de 2005. El ministro de Transportes anunció para agosto de 1993, la segunda etapa de la licitación de recorridos para la locomoción colectiva; esta regularía un sistema global de transporte, que sólo excluiría algunas áreas de la ciudad (QUE PASA, 1997).

En marzo de 1993 se inició la segunda fase del plan maestro para descontaminar Santiago, que incluyó la fiscalización de procesos productivos, control de chimeneas domiciliarias a leña (DS 811 del MINSAL), retiro de buses antiguos y nuevas plantas de revisión

técnica (QUE PASA, 1997). La gran cantidad de días por sobre la norma de MP10 (83 días en 1992, 84 días en 1993, 70 días en 1994, etc.) sumado a los altos niveles de ozono, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno obligó a la autoridad ambiental a declarar en el año 1996 a la Región Metropolitana como zona saturada por MP10, PTS, O₃ y CO y latente por NO₂ (DS 131 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia). A fines del año 1996, comenzó la reconversión masiva de industrias a usar gas natural proveniente de Argentina, dejando de lado combustibles más contaminantes como la leña y el diesel (Alliende, 2004).

En abril de 1997 se inauguró la red ampliada de monitoreo de Santiago denominada MACAM2, financiada en un 80% por la cooperación del gobierno de Japón y un 20% por el Ministerio de Salud. La red compuesta por 8 estaciones implementadas con monitores continuos para medición de CO, SO₂, NO₂, O₃ e hidrocarburos totales mantuvo la ubicación de las estaciones de Av. La Paz, Providencia, Las Condes y Parque O'Higgins, ampliando la cobertura con estaciones en Pudahuel, El Bosque, La Florida y Cerrillos. Para la medición de MP10 se instalaron monitores continuos TEOM (basados en la metodología Microbalanza de Oscilación de sensor en voladizo con cabezal MP-10) que entregan concentraciones con resoluciones horarias, lo cual permitió conocer el comportamiento del MP10 durante el día (ASRM, 2008). En adelante, el cálculo del ICAP correspondió a la mayor concentración móvil de 24h de MP10 registrada durante el día en alguna de las estaciones de la red MACAM2.

En 1998 el DS 16 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia estableció un Plan de Prevención y Descontaminación para la Región Metropolitana (PPDA) que fijó metas de emisión de contaminantes como también acciones de corto, mediano y largo plazo con el objetivo principal de lograr el cumplimiento de todas las normas de calidad de aire a partir del año 2012. El mismo año, el D.S. 59 de MINSEGPRES estableció en la norma primaria que el percentil 98 de las concentraciones diarias de MP10 durante un año calendario no debe superar 150 µg/m³N. Posteriormente, en el año 2001 el D.S. 59 fue complementado con el D.S. 45 de MINSEGPRES que fija en 50 µg/m³N el valor máximo permitido para los promedios anuales de tres años consecutivos.

En el año 2000, la Resolución 10047 de SESMA aprobó el uso de la metodología de pronóstico de calidad de aire para material particulado respirable MP10, en la Región Metropolitana.

En el año 2001, se revisó y actualizó el PPDA de la Región Metropolitana. En enero de 2004 el DS58 de MINSEGPRES aprobó la actualización del PPDA. Las principales medidas de esta versión del PPDA se presentan en el Cuadro 3-6.

Las medidas del PPDA se han concentrado en controlar las emisiones del sector industrial, produciendo un mayor impacto en la disminución de la fracción fina del MP, la cual corresponde principalmente a productos de combustión incompleta.

Cuadro 3-6 Principales medidas de PPDA 2004

| Tipo de medida | Medidas específicas |
|--|---|
| Renovación de buses | <ul style="list-style-type: none"> • Retiro de 2.700 buses pre-EPA • Incorporación de 1.000 buses de baja emisión |
| Disminución de emisiones asociadas a camiones | <ul style="list-style-type: none"> • Norma EURO III y EPA98 • Incorporación de sistemas de post tratamiento |
| Nuevas normas de ingreso vehículos livianos | <ul style="list-style-type: none"> • Norma Tier1 y EURO III |
| Control del polvo | <ul style="list-style-type: none"> • Aspirado de calles • Pavimentado de calles |
| Mejora de los combustibles | <ul style="list-style-type: none"> • Calidad del diesel de 300 a 50 ppm • Mejora calidad de la gasolina, año 2003 • Mejora calidad de la gasolina, año 2005 • Restricción progresiva Quema de leña |
| Nuevas normas para la industria | <ul style="list-style-type: none"> • Norma de emisión CO en la industria • Norma de emisión de SOx en la industria • Programa de reducción de SOx en mayores emisores procesos industriales |
| Sistema Integrado de Compensaciones y Permisos de Emisión Transables | <ul style="list-style-type: none"> • Cupos de emisión NOx en la industria • Cupos de emisión MP10 en procesos industriales • Compensación de emisiones 150% para toda nueva actividad (industria y transporte) |

La Figura 3-7 ilustra las principales medidas para disminuir emisiones y la evolución de los promedios anuales de MP10. Se aprecia una disminución importante del promedio de la fracción fina entre 1988 y 1994; desde 1995 la pendiente se hace menor cada año. La fracción gruesa, que corresponde principalmente a emisiones de polvo desde calles y polvo natural, no muestra variaciones significativas en el transcurso de los años, registrando un leve aumento entre 1993 y 1994 asociado al impacto de la construcción de la Ruta 5. Desde el año 2005 hay un aumento de ambas fracciones producto, principalmente, de las restricciones de gas natural para uso industrial y el aumento del consumo de leña para calefacción domiciliaria.

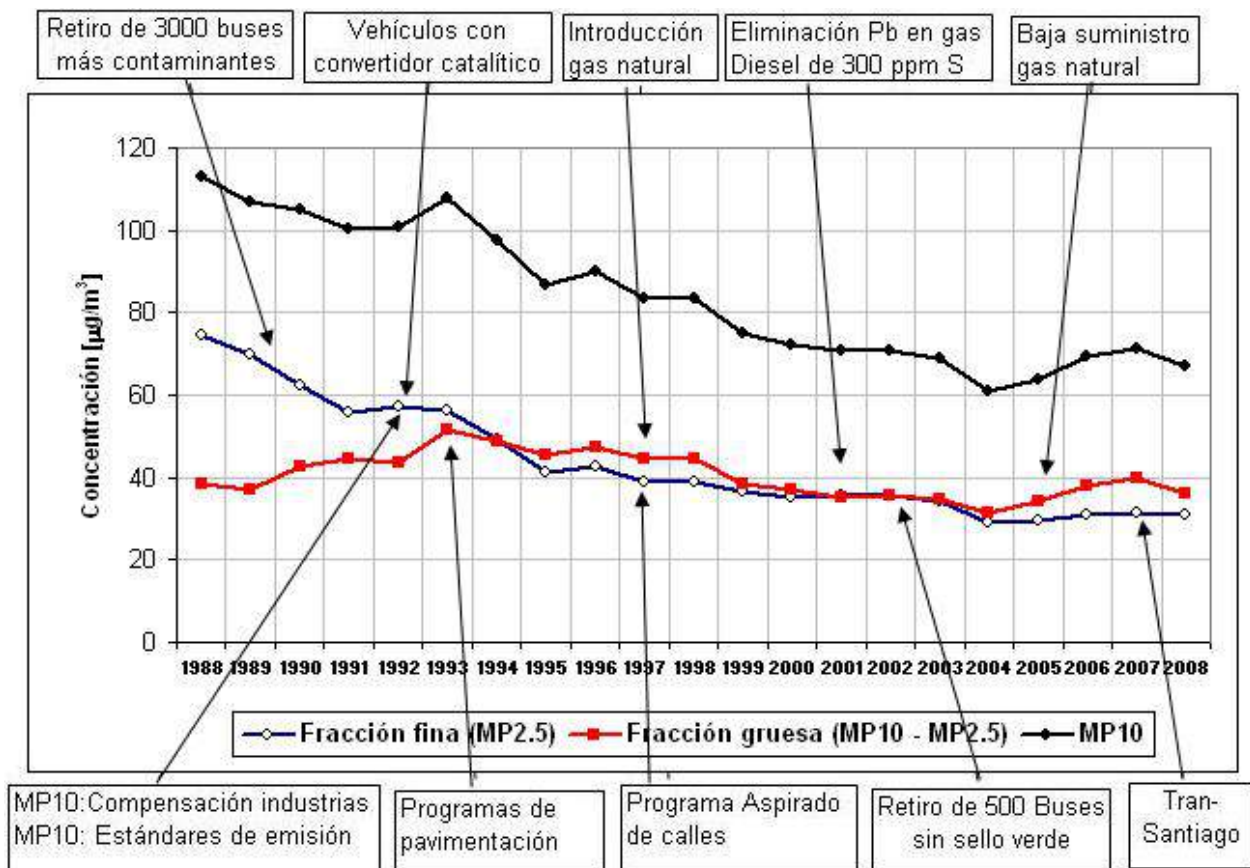


Figura 3-7 Evolución de los promedios anuales de MP10 y fracciones fina y gruesa asociada a las medidas de disminución de emisiones de MP10 en Santiago. Mediciones en estaciones Parque O’Higgins, Las Condes y La Paz 1988 a 2008.

A la fecha no se ha elaborado un inventario oficial con información a nivel comunal, por lo cual no existe información oficial específica para Pudahuel. CONAMA está implementando una base de datos oficial de emisiones de fuentes fijas y móviles georreferenciadas mediante el módulo EDB del software Airviro, el cual ha presentado dificultades para establecer y asignar las emisiones de fuentes areales y difusas. Además, la mayoría de las emisiones están calculadas sobre la base de un ciclo de funcionamiento estándar que considera la distribución de manera uniforme durante períodos de tiempo (semana, meses, año), lo cual no permite realizar una distribución temporal de las emisiones, siendo aún más difícil conocer la distribución de las emisiones durante el día (ciclo diario).

El Cuadro 3-7 presenta un resumen de las emisiones anuales de MP10, MP2,5, CO, NOx, COV, SOx y NH₃ para las categorías de fuentes estacionarias y fuentes móviles, en las cuales las emisiones de MP10 corresponden mayoritariamente a material particulado fino de acuerdo a los valores de MP2,5. En cambio, el polvo emitido por las fuentes difusas corresponde principalmente a material particulado grueso.

Cuadro 3-7 Inventario de emisiones anual, escenario 2005 real, Región Metropolitana

| Categoría de fuente | MP10 t/año | MP2,5 t/año | CO t/año | NOx t/año | COV t/año | SOx t/año | NH ₃ t/año |
|--------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Industria | 1266,9 | 994,0 | 7744,5 | 1232,1 | 7541,6 | 12829,3 | 217,4 |
| Combustión leña residencial | 693,1 | 673,6 | 8235,0 | 84,8 | 7465,6 | 11,8 | 71,0 |
| Otras residenciales | 78,9 | 69,6 | 338,3 | 1160,9 | 41241,6 | 294,2 | 3800,4 |
| Comerciales | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7910,6 | 0,0 | 0,0 |
| Quemas agrícolas | 246,54 | 234,75 | 2139,19 | 101,55 | 171,4 | 11,73 | 11,54 |
| Otras areales | 651,5 | 465,8 | 5249,0 | 135,9 | 18605,7 | 0,0 | 27724,9 |
| Total estacionarias | 2937,1 | 2437,7 | 23706,0 | 13815,2 | 82939,6 | 13146,9 | 31825,2 |
| Buses licitados | 221,4 | 196,0 | 1436,6 | 5866,7 | 714,6 | 21,6 | 1,9 |
| Otros buses | 94,9 | 82,1 | 515,1 | 2507,3 | 235,2 | 9,2 | 1,2 |
| Camiones | 763,2 | 670,6 | 3514,8 | 11179,5 | 2199,3 | 43,5 | 6,5 |
| Veh livianos catalíticos * | 189,9 | 0,0 | 59110,5 | 4850,2 | 4394,6 | 50,8 | 1002,3 |
| Veh livianos no catalíticos* | 40,1 | 0,0 | 142544,0 | 11524,2 | 11631,3 | 11,8 | 6,0 |
| Veh livianos diesel* | 282,8 | 248,9 | 1071,2 | 903,9 | 145,7 | 7,0 | 0,9 |
| Veh livianos a gas* | 1,7 | 0,0 | 654,2 | 46,9 | 40,5 | 0,0 | NE |
| Motos* | 1,8 | 0,0 | 3971,4 | 24,6 | 706,5 | 0,4 | 0,3 |
| Fuera de ruta | 154,5 | 142,0 | 2215,2 | 973,3 | 320,3 | 45,5 | 31,6 |
| Total móviles | 1750,3 | 1339,7 | 215032,9 | 37876,4 | 20388,0 | 189,8 | 1050,7 |
| Total móviles y estacionarias | 4687,4 | 3777,4 | 238738,9 | 51691,5 | 103327,6 | 13336,7 | 32875,9 |

Fuente: CONAMA-DICTUC, 2006

* Las emisiones de MP10 corresponden a desgaste de frenos y neumáticos, no a combustibles.

NE: No Estimado

El Cuadro 3-8 presenta un resumen de las emisiones anuales de PTS, MP10 y MP2,5 para las fuentes difusas en la Región Metropolitana:

Cuadro 3-8 Inventario de emisiones anuales de material particulado, escenario 2005 real, Región Metropolitana

| Categoría de fuente | PTS t/año | MP10 t/año | MP2,5 t/año |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Construcción de edificios | 2362,5 | 1157,8 | 47,2 |
| Construcción de caminos | 85,6 | 55,5 | 1,3 |
| Producción de áridos | 1067,0 | 380,9 | NE |
| Total construcción y demolición | 3515,0 | 1594,2 | 48,5 |
| Calles sin pavimentar | 75407,9 | 14560,5 | 2073,7 |
| Calles pavimentadas | 16861,1 | 4608,4 | 681,2 |
| Total polvo resuspendido | 92269,0 | 19168,9 | 2754,9 |
| Cereales y chacras | 116,4 | 85,0 | 34,9 |
| Cultivos industriales | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| Hortalizas | 163,0 | 119,0 | 48,9 |
| Frutales | 27,4 | 20,0 | 8,2 |
| Total preparación terreno agrícola | 307,1 | 224,2 | 92,0 |
| Total polvo fugitivo | 96091,2 | 20987,3 | 29898,5 |

Fuente: CONAMA-DICTUC, 2006

NE: No estimado

4 Materiales y método

El trabajo se divide en dos etapas: la primera corresponde a la Identificación y estudio de las causas que originan concentraciones elevadas de MP10 en el sector de Pudahuel durante días de episodios críticos de contaminación en Santiago; la segunda, a la propuesta de medidas que permitan reducir la ocurrencia de altas concentraciones de MP10 mejorando con ello la calidad de aire en Pudahuel y en Santiago.

El desarrollo de la primera etapa consideró las siguientes actividades:

1. Recopilación de información.
2. Estudio crítico de la información recopilada.
3. Análisis de medidas estructurales y de corto plazo del plan de prevención y descontaminación de la Región Metropolitana (PPDA), del sistema de gestión de episodios críticos de contaminación del PPDA y de otros estudios con propuestas para disminuir la contaminación por material particulado en Santiago.

La metodología utilizada para ejecutar cada una de las actividades se presenta a continuación:

4.1 Recopilación de información

La recopilación de información incluyó:

1) Recopilación de información de MP10 y meteorología para elaborar un diagnóstico de la calidad de aire en Pudahuel. Se recopiló la información histórica de MP10 disponible en la red de monitoreo de la Autoridad sanitaria Región Metropolitana (ASRM), en el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) y en la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana (CONAMA RM), con énfasis en el período 2000 – 2008. Además, se recopilaron estudios sobre el comportamiento del MP10 en Santiago, la estadística oficial de las contingencias ambientales, la información meteorológica de la cuenca de Santiago (promedios horarios de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, días con precipitaciones) e informes del sistema de pronóstico de episodios.

2) Análisis de datos primarios de campañas de mediciones de material particulado realizadas por CENMA en los años 1999 y 2003 para determinar la extensión geográfica del área de altas concentraciones en la zona de Pudahuel.

3) Recopilación de información para estudiar los factores que generan altas concentraciones de MP10 en la zona de Pudahuel. La información recopilada incluye los siguientes temas:

- Inventario de emisiones para la Región Metropolitana escenario 2005 (DICTUC, 2007).

- Caracterización física y química de emisiones de material particulado desde fuentes industriales y naturales en Santiago.
- Caracterización física y química de la contaminación por material particulado en Santiago.
- Modelación de la dispersión de la contaminación atmosférica en Santiago.
- Comportamiento de variables meteorológicas durante episodios críticos de contaminación.

4) Recopilación del Plan de prevención y descontaminación de la Región Metropolitana y sus posteriores actualizaciones (CONAMA, 1998; CONAMA, 2004; CONAMA, 2008). Además, se incluye la recopilación de las auditorías al PPDA realizadas en los años 2000 y 2005.

5) Propuestas para disminuir la contaminación por material particulado respirable MP10.

4.2 Estudio crítico de la información recopilada

4.2.1 Información histórica de MP10 en Santiago y Pudahuel

La información de MP10 y meteorología utilizada corresponde a datos oficiales con porcentajes superiores a 75% de datos válidos para los períodos de análisis (diarios, mensuales, anuales), organizada de la siguiente manera:

- La base de datos de calidad de aire de la Red de monitoreo automático de contaminantes atmosféricos y meteorología (MACAM), utilizando planillas de cálculo y software estadísticos que incorporen análisis multivariado y análisis de componentes principales (SPSS versión 8.0 para windows).
- Para el despliegue de gráficos de correlación, series de tiempo y ciclos diarios se utilizó el software Airviro de CENMA. La mayoría de los gráficos incluidos en la tesis se construyeron con planilla de cálculo Microsoft Excel.

Además, utilizando Excel se realizó un cruce entre material particulado y datos meteorológicos para identificar conductas o correlaciones que permitan identificar las causas de las altas concentraciones de MP10 en Pudahuel. Los resultados de esta etapa corresponden principalmente a gráficos de series de tiempo, promedios mensuales, promedios anuales, rosas de concentraciones de MP, ciclos diarios y anuales, gráficos de dispersión entre MP y parámetros meteorológicos.

4.2.2 Extensión geográfica de las concentraciones de MP10 en Pudahuel

Se analizaron los datos primarios de campañas de mediciones de material particulado que realizó CENMA en los años 1999 y 2003 en la zona de Pudahuel.

La primera campaña consideró mediciones de MP10 (concentraciones horarias) con monitor continuo TEOM (Tapered element oscillating microbalance) en la zona de Pudahuel entre agosto y septiembre de 1999. Este periodo corresponde a la etapa final de la gestión de episodios críticos de contaminación de MP10 del año 1999, época de transición invierno-primavera durante el cual comienza a mejorar la ventilación de la cuenca de Santiago. Las mediciones se realizaron en 2 lugares; uno de ellos en la zona de la Municipalidad de Pudahuel ubicada a 1 km al sureste de la estación de monitoreo Pudahuel de la red MACAM2, dentro del área de representatividad poblacional (radio de 2 km). El otro lugar corresponde a una parcela privada ubicada en el Camino La Farfana, un sector suburbano a unos 6 km al suroeste de la estación Pudahuel y por lo tanto fuera del área de representatividad poblacional. La Figura 4-1 ilustra la ubicación de los lugares, incluyendo, además, la ubicación de las estaciones Pudahuel y Cerro Navia de la Red MACAM2.

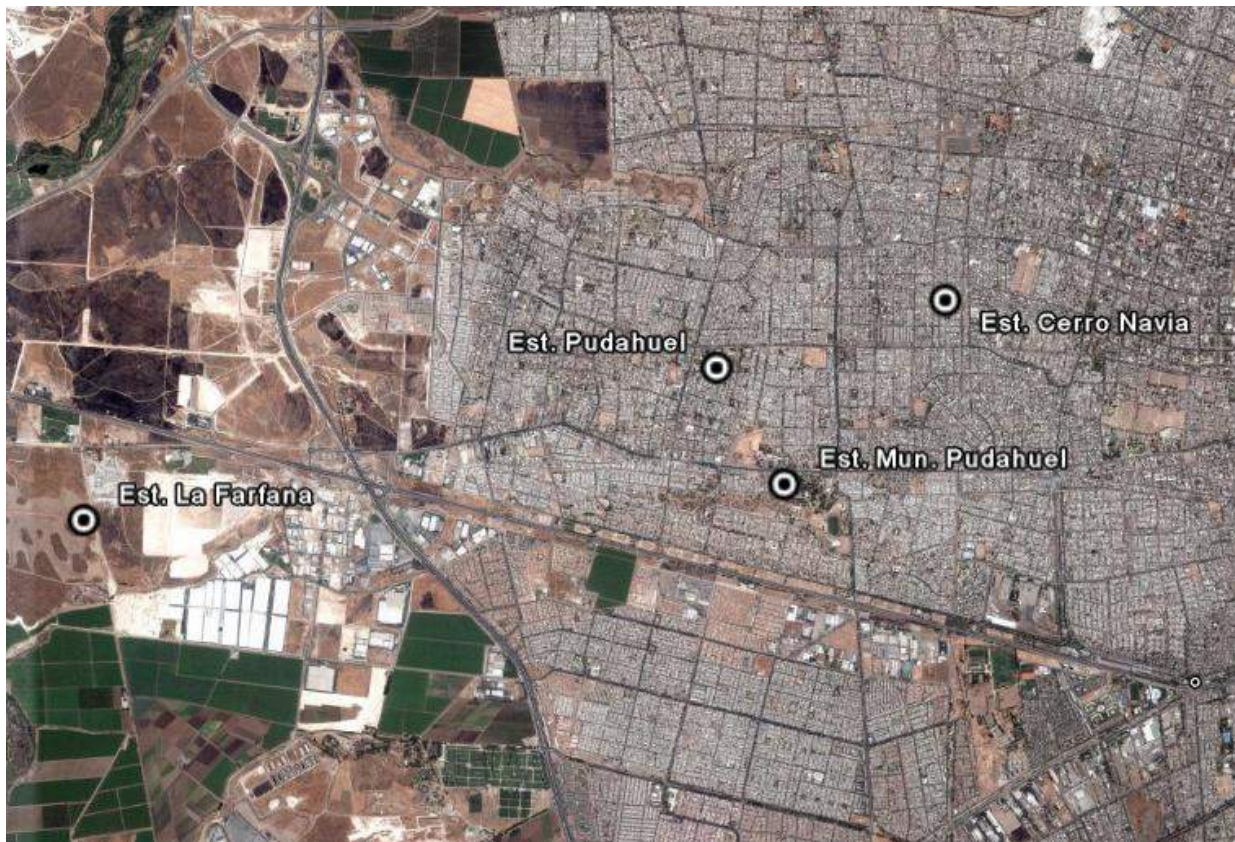


Figura 4-1 Ubicación de las estaciones Pudahuel, Municipalidad de Pudahuel y Parcela en La Farfana para la campaña de mediciones de MP10. Agosto-septiembre de 1999

Las concentraciones de MP10 obtenidas en la Municipalidad de Pudahuel y La Farfana fueron comparadas con las concentraciones de MP10 de la estación Pudahuel mediante gráficos de series de tiempo y ciclos diarios, para lo cual se usó Excel.

En el invierno de 2003, CENMA realizó otra campaña en Pudahuel, en la zona cercana a la estación de monitoreo, para determinar la extensión espacial del área de altas concentraciones de MP10 a las horas en que éstas alcanzan su valor máximo diario, es decir entre 20h y 02h. La zona de estudio abarcó un área de unos 6 x 6 km aproximadamente, incluyendo las zonas de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la red MACAM2 en Pudahuel y Cerro Navia. Se privilegiaron días de condiciones meteorológicas de episodio, esto es, cuando se esperaban mayores niveles de MP10 en la noche, pero también se incluyeron días con bajas concentraciones. No se realizaron mediciones en noches con precipitación o con ingreso de aire húmedo (neblinas) desde la costa. La metodología de medición consideró un monitor continuo de MP10 TOPAS de tipo nefelómetro instalado sobre el techo de un vehículo, programado para registrar concentraciones minuto a minuto de MP10.

El programa de mediciones se extendió entre el 10 de julio y el 1 de septiembre de 2003, con mediciones durante 17 noches. Se realizaron dos tipos de recorridos pre-definidos, en un área que incluye sectores urbanos en las comunas de Pudahuel, Cerro Navia, Renca y Lo Prado. Se utilizó un equipo GPS para georreferenciar las concentraciones de MP10. El Recorrido 1, que se muestra en la Figura 4-2, se efectuó durante las primeras 6 noches de medición. Consistió en un recorrido por el sector exterior y luego por el interior, en torno a las estaciones Pudahuel y Cerro Navia. El tiempo total del recorrido es extenso por lo que solamente se realizó una vez en cada noche. El análisis preliminar de los resultados obtenidos indicó la conveniencia de modificar el recorrido.

El Recorrido 2, que se muestra en la Figura 4-3, se efectuó en las 11 noches siguientes, considerando un barrido del sector siguiendo trayectos norte-sur y sur-norte por las principales calles de la zona estudiada. El Recorrido 2 es más corto, por lo que en cada noche se lograron realizar dos recorridos. Este recorrido incluye trayectos por el borde norte del Río Mapocho, en la Comuna de Renca.

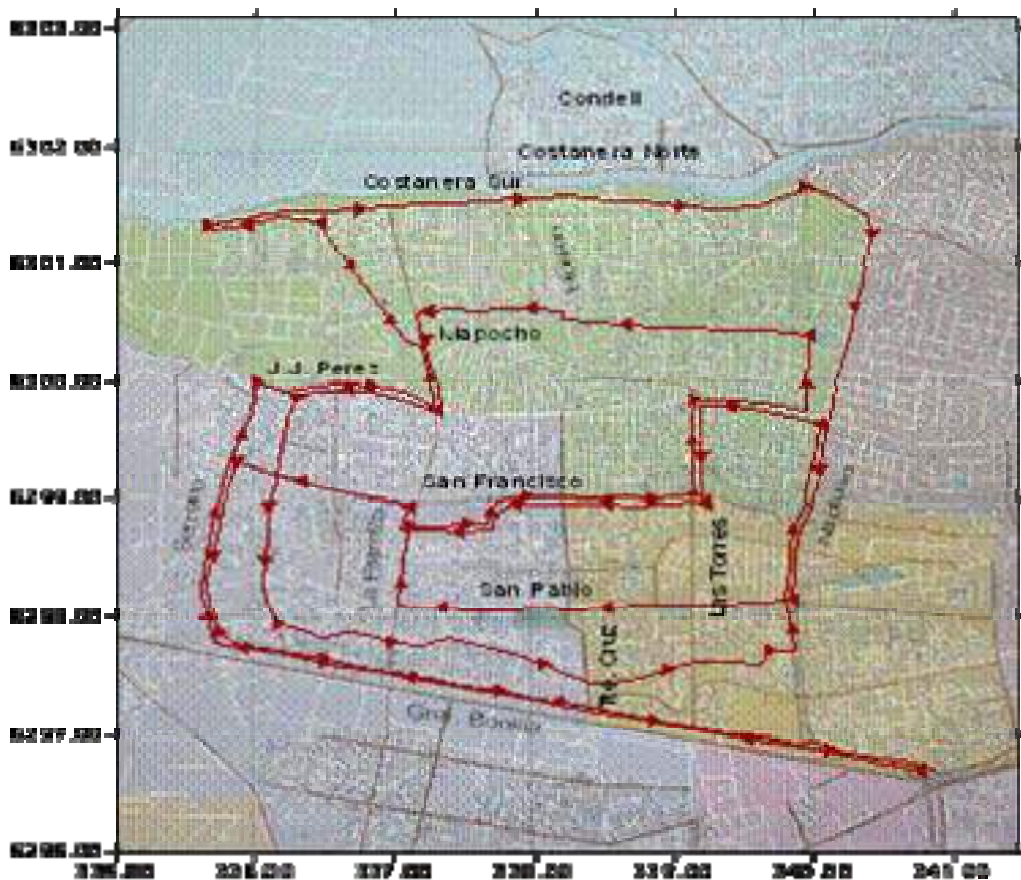


Figura 4-2 Recorrido 1 con vehículo instrumentado en la zona de Pudahuel, julio de 2003

La información recolectada fue procesada para construir promedios horarios, separando en 2 períodos de acuerdo a la denominación propuesta por Muñoz *et al.* (2003) de episodios tempranos (entre 20h y 23h) y episodios tardíos (de 23h a 02h). Posteriormente, las concentraciones georreferenciada fueron procesadas con el software SURFER 8.0 para generar mapas de isolíneas de concentraciones para cada recorrido con equipo instrumentado de MP10 en la zona de Pudahuel. Cada mapa fue exportado a una hoja de cálculo en formato de grilla (x, y, z), lo cual permitió construir hojas promedios de cada uno de los puntos de grilla para días de episodios tipo A y tipo BPF. Las hojas de cálculo promedio de la grilla fueron importadas en SURFER para generar un mapa de isolíneas de concentración promedio de la zona de Pudahuel para episodio tipo A y promedio para episodio tipo BPF; en ambos casos se construyó, además, mapas para los períodos 20h a 23h y 23h a 02h.

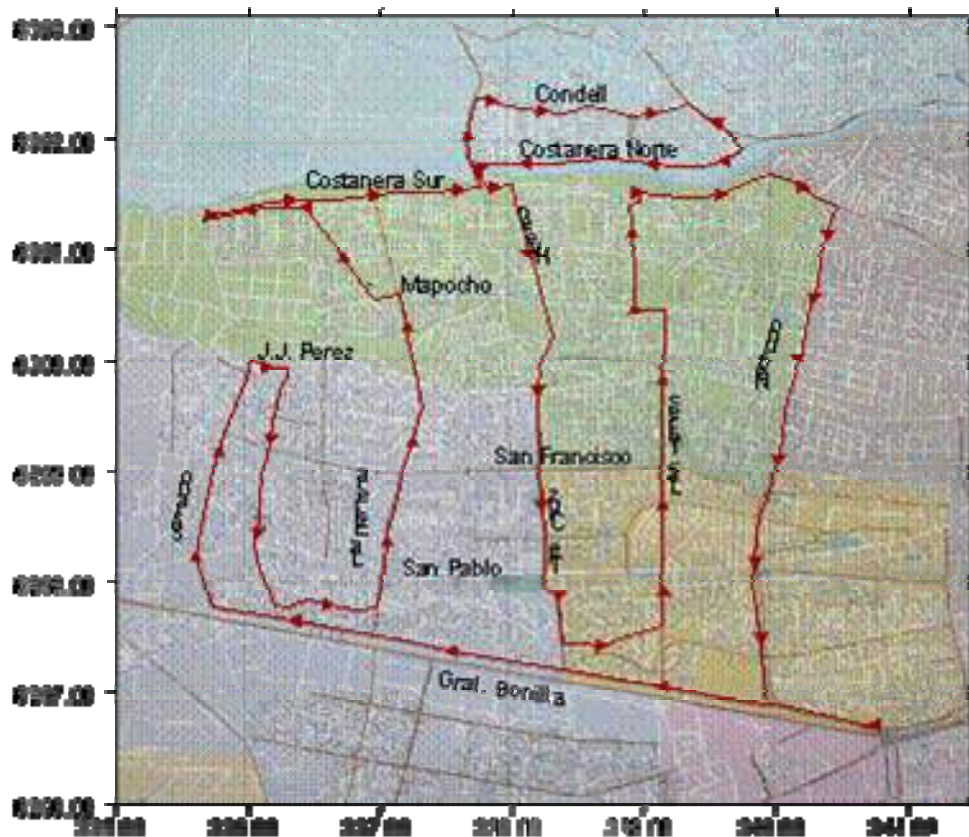


Figura 4-3 Recorrido 2 con vehículo instrumentado en la zona de Pudahuel, julio-septiembre de 2003

4.2.3 Factores que afectan las altas concentraciones de MP10 en Pudahuel

El análisis de los factores responsables de las altas concentraciones de MP10 en Pudahuel consideró: probar la hipótesis de que existen factores físicos y químicos que afectan las concentraciones de MP10 en Pudahuel, entre ellos: 1) el comportamiento del viento en Pudahuel para los días de episodio; 2) el comportamiento del régimen de vientos en la zona de Pudahuel; 3) el inventario de emisiones de la zona de Pudahuel respecto de la Región Metropolitana; 4) los resultados de los análisis de especiación física y química para fuentes emisoras de MP10 y para muestras ambientales.

Para probar la hipótesis de que la velocidad del viento medido en la estación de Pudahuel es distinta de la velocidad del viento en el resto de las estaciones para días de episodio, se realizó una comparación estadística entre promedios horarios de velocidad del viento medida en Pudahuel versus cada una de las velocidades medidas en las otras estaciones utilizando diferentes test de igualdad de mediana entre pares de variables para un nivel de significancia de 5%, entre ellos Wilcoxon/Mann, Whitney, Kruskal-Wallis y Chi-cuadrado usando el software

eViews. Se utilizó la mediana por ser un estadístico más robusto ante la presencia de valores extremos (outliers) en la media. Los tests se realizaron por separado para los episodios tipo A y los episodios tipo BPF registrados entre los años 2004 y 2007, tanto para series de datos originales como para series de datos suavizadas mediante promedios móviles de orden 24 (por ser series de días de 24 horas). Previamente, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos, basado en gráficos y estadísticos (mínimos, máximos, media, mediana, desviación estándar, etc) para comprender mejor el comportamiento de las variables o series de tiempo individual y conjuntamente.

Para estudiar el comportamiento del viento en la zona de Pudahuel se utilizó la información registrada en la estación de la red MACAM2 en la comuna de Pudahuel. Se seleccionaron aquellos días de episodios con concentraciones diarias mayores o iguales al valor de la norma ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) entre los años 2004 y 2007 y se comparó el comportamiento de MP10, velocidad y dirección de viento mediante el uso de gráficos de dispersión, ciclos diarios y rosas de viento elaborados con Excel.

Se estudiaron las emisiones de MP10 de fuentes estacionarias en Pudahuel desde la base de datos de emisiones de CONAMA RM para el año 2008 (CENMA, 2008b), la cual está en formato Excel. Se extrajo la información para Pudahuel, se calculó la emisión anual multiplicando la emisión diaria por los días de funcionamiento de las fuentes y la emisión horaria dividiendo la emisión diaria por el número de horas de funcionamiento de las fuentes. Posteriormente, se agrupó la información por categorías de fuentes y se interpretó comparándola con el comportamiento del MP10. Además, utilizando el software GoogleEarth (disponible en <http://earth.google.com/>) se georreferenciaron en un mapa digital las principales fuentes emisoras de MP10 en la comuna de Pudahuel, especialmente aquéllas dentro del radio de 2 km de representatividad espacial de la estación de monitoreo de la red MACAM2 en Pudahuel.

Para identificar diferencias en la participación de las fuentes contaminantes entre días con y sin episodios se hizo un re-análisis a un conjunto de muestras de las fracciones fina y gruesa de MP10 recolectadas en la estación Pudahuel durante la campaña organizada por CONAMA en el año 1998 (Artaxo, 1999) mediante análisis de componentes principales absolutas (utilizando el software estadístico SPSS versión 8.0 para Windows). Se comparó, además, el comportamiento de las especies químicas presentes en muestras de material particulado MP10 tomadas en la campaña de CONAMA en el invierno de 2005 (Gramsch, 2006); en este caso, el limitado número de muestras no permitió aplicar análisis de componentes principales absolutas.

4.3 Medidas del PPDA y otros estudios aplicados a la comuna de Pudahuel

Se revisaron las distintas versiones y auditorías del Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA) para la Región Metropolitana para analizar las medidas de corto, mediano y largo plazo para la reducción de las emisiones de MP10. Las actividades realizadas incluyeron:

- Descripción del funcionamiento del sistema de gestión de episodios, identificando las unidades y personas encargadas en los organismos competentes de coordinar la ejecución de las medidas durante episodios para detectar debilidades y fortalezas.
- Estimar cualitativamente, ya que la información disponible no permite un mayor análisis, la efectividad de las medidas de reducción de emisiones de MP10, en el largo plazo y durante episodios, a partir del análisis de tendencia de concentraciones de MP10 y análisis del comportamiento de días de alta contaminación.
- Verificar si el pronóstico de MP10 es una herramienta real de apoyo a la gestión de episodios y qué aspectos se deben mejorar haciendo un análisis crítico de la información disponible desde el año 1997.
- Estudiar otras medidas de reducción de emisiones y propuestas de mejoramiento al plan de gestión de episodios críticos por MP10 contenida en estudios, publicaciones y propuestas de organizaciones no gubernamentales para disminuir la contaminación por material particulado en Santiago.

4.4 Método para la elaboración de propuesta de medidas para disminuir las concentraciones de MP10 en Pudahuel

Sobre la base de la experiencia del autor en contaminación atmosférica, a partir del análisis cualitativo de las medidas de reducción de emisiones y de la gestión de la calidad del aire propuestos en el PPDA y en otros estudios se elaborará una serie de medidas destinadas a disminuir la contaminación por MP10 en Pudahuel,.

5 Resultados y discusión

5.1 Comportamiento de las concentraciones de material particulado medidas en Santiago

La Figura 5-1 presenta el número de días que han superado los niveles ICAP 100, ICAP 300 e ICAP 500 entre 1989 y 2008 en las estaciones Parque O'Higgins, La Paz, Las Condes y Providencia de la red MACAM histórica. Para el cálculo de días se consideró el máximo valor ICAP diario registrado entre las distintas estaciones, el cual se clasifica de acuerdo a los valores presentados en el Cuadro 3-5. Producto de la implementación de medidas de reducción de emisiones de material particulado se aprecia una continua disminución del número de días que superan los distintos niveles de ICAP. En el año 1998 hay una fuerte reducción, especialmente en ICAP 100 respecto a los años anteriores producto principalmente del cambio de petróleo diesel a gas natural en el sector industrial. Entre el 2000 y el 2004 no hay medidas significativas para la disminución de las emisiones de MP10 produciéndose un estancamiento de los niveles con leves diferencias debido a la variabilidad meteorológica entre los años. Desde el 2005 hay mayor escasez de gas natural (crisis energética en Argentina, país abastecedor) por lo cual las industrias comienzan a utilizar nuevamente diesel lo que lleva a un aumento de las emisiones.

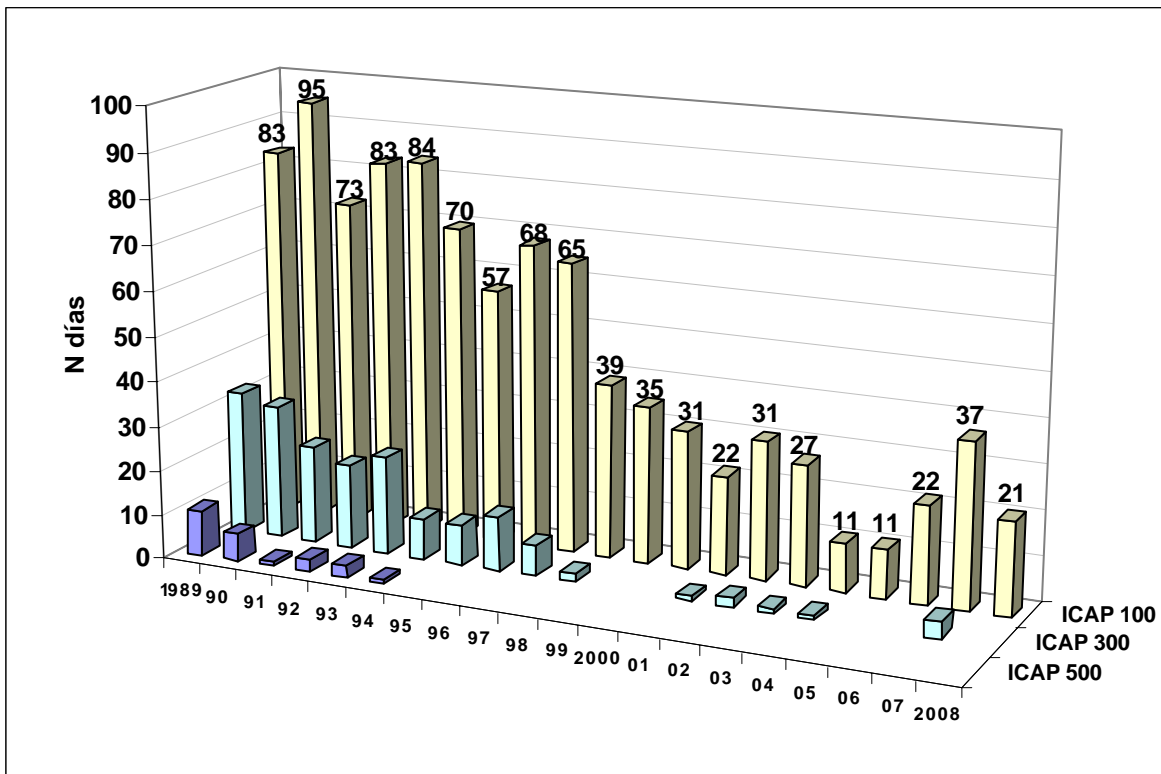


Figura 5-1 Evolución de la cantidad de días sobre ICAP 100, 300 y 500 en las estaciones históricas de la red MACAM (mediciones con dicótomos) entre años 1989 y 2008.

La Figura 5-1 muestra que la última emergencia (concentración diaria mayor a ICAP 500) en alguna de las estaciones de la red MACAM histórica ocurrió el año 1994.

La Figura 5-2 presenta la evolución de los días de contingencia ambiental para el período 1997-2008 registrados en la red MACAM2 que considera la red MACAM histórica más estaciones en las comunas de Pudahuel, Cerrillos, El Bosque y La Florida; durante el año 2008 se incluyó la estación en Cerro Navia a menos de 2 km de estación Pudahuel. Se aprecia una continua disminución entre los años 1997 y 2005 producto de la implementación de medidas del PPDA. Desde el año 2005 hay un aumento asociado principalmente a la crisis energética que obligó al uso de petróleo diesel en industrias que estaban usando gas natural; el año 2008 disminuyeron los eventos respecto al año 2007. En el año 1997 se registraron de 38 alertas (días sobre ICAP 200), 37 pre-emergencias (sobre ICAP 300) y 3 emergencias (sobre ICAP500). En el año 2008 se registraron 14 alertas y 4 pre-emergencias. La última emergencia se registró en el año 1999 con un ICAP de 511.

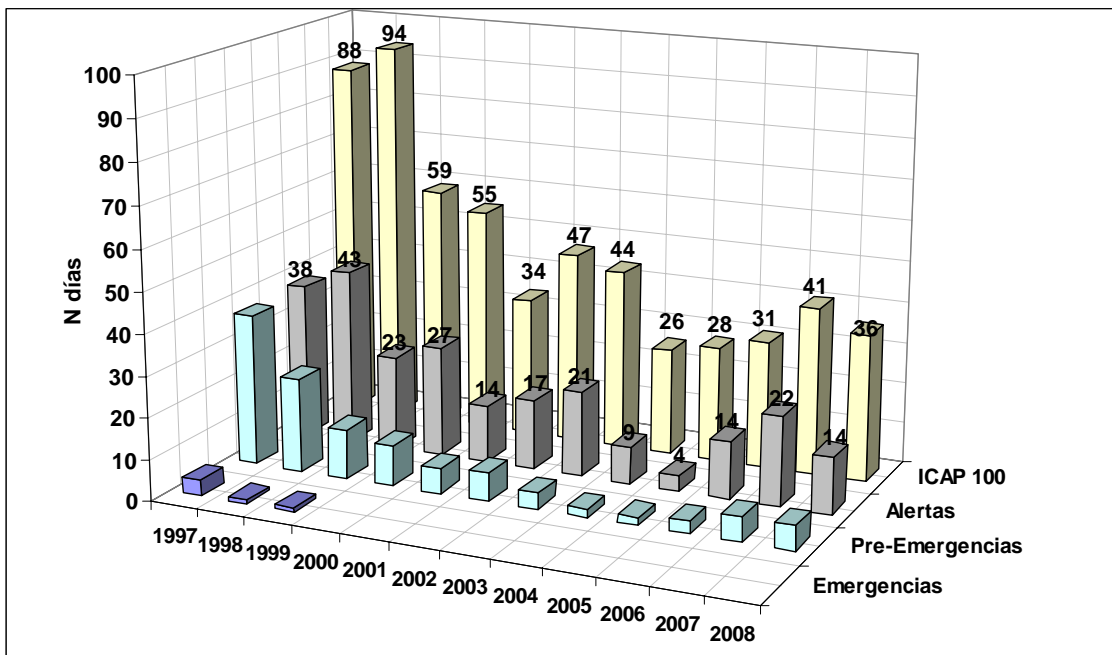


Figura 5-2 Evolución de la cantidad de días de contingencia ambiental por MP10 en las estaciones de la red MACAM2 (mediciones con equipos TEOM) entre años 1997 y 2008

La ampliación de la cobertura de la red de monitoreo en 1997 permitió identificar sectores con mayor contaminación por MP10, lo cual explica el aumento de días sobre los niveles de ICAP 100 (de 65 a 88 en el año 1997 y de 35 a 59 en el año 1999, por ejemplo) respecto a los

valores presentados en la red histórica (Figura 5-1); ello significa la existencia de otras comunas, además de Pudahuel con altos niveles de concentración de MP10.

El uso de monitores continuos para la medición de MP10 significó una modificación del cálculo de ICAP el cual se definió como el mayor promedio móvil de 24h registrado en alguna de las estaciones de la red de acuerdo a lo establecido en la norma primaria para MP10 en el año 1998 (DS59 de MINSEGPRES). Esta modificación puede provocar tener 2 días seguidos con ICAP sobre un nivel de contingencia producto de altas concentraciones durante la noche debido a la inercia del promedio móvil de 24h, situación que no ocurre en la red histórica donde se realiza un muestreo por un período fijo de 24 horas.

La Figura 5-3 ilustra la evolución de los máximos diarios de concentraciones móviles de 24 horas registrados en la red MACAM2 y en la estación Pudahuel desde abril de 1997 hasta diciembre de 2008. Se aprecia que para la mayoría de los días el valor máximo de promedio móvil de 24h registrado en la red MACAM2, especialmente en días de altas concentraciones, corresponde a la máxima concentración móvil de 24h registrada en la estación Pudahuel. Los máximos registrados en el año 1997 fueron cercanos a 380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en cambio en el año 2008 fueron cercanos a 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

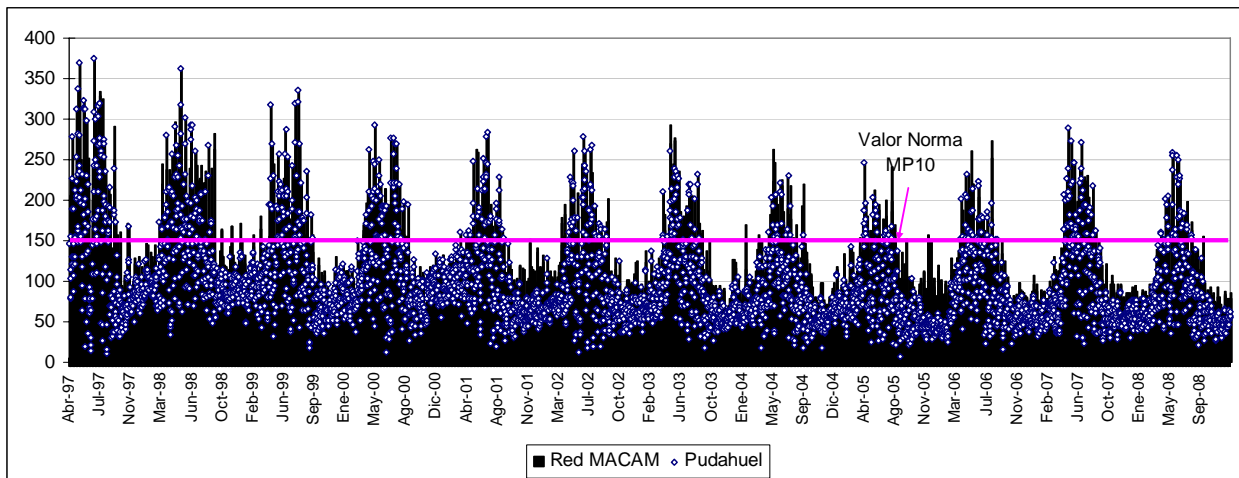
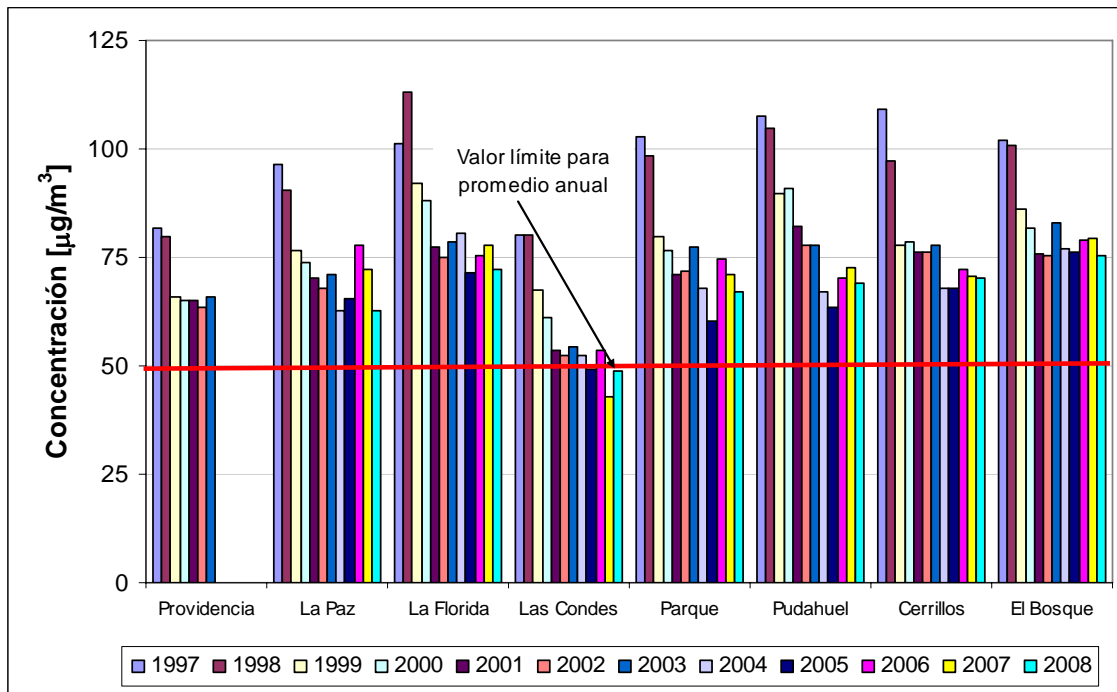


Figura 5-3 Máximos diarios de concentraciones móviles de 24h de MP10 en Red MACAM2 y estación Pudahuel, período 1997 a 2008

Durante el período 1997 a 2008, se registraron 371 días de episodios críticos por MP10 (concentraciones diarias sobre el nivel de alerta, iguales o mayores a 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$). Del total de episodios críticos, 130 días superaron el nivel de pre-emergencia (240 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), de éstos, la estación Pudahuel presentó en 88 ocasiones las concentraciones más altas, lo cual corresponde a un 68% de los casos (la mayoría de esos días coincide con episodios Tipo A); durante los casos restantes, generalmente episodios tipo BPF, los niveles más altos se

presentan en El Bosque, Cerrillos y La Florida (CENMA, 2005). Por otro lado, si la estación Pudahuel no fuese considerada para declarar episodios, se registrarían 310 días de episodios críticos, lo cual corresponde a una reducción de un 19% de los casos.

La Figura 5-4 muestra para cada una de las estaciones de la red MACAM2 la evolución de los promedios anuales para el período 1997–2008. La estación Providencia tiene información sólo hasta el año 2003, ya que fue retirada por considerarse que no tenía representatividad poblacional.



Nota: en 1997 las mediciones comenzaron en abril

Figura 5-4 Promedios anuales de MP10 desde 1997 a 2008, mediciones con monitores TEOM en Red MACAM2

Para varias estaciones, excepto La Florida, se aprecia un descenso de los promedios anuales entre 1997 y 1998, situación que continúa el año 1999. Entre los años 2000 y 2005 los valores disminuyen, pero con menor intensidad que los primeros años. Los años 2006 y 2007 registran un aumento de los promedios anuales en Pudahuel, La Florida y El Bosque, situación que se revierte el año 2008 cuando disminuyen los promedios, excepto en Las Condes. En 1997, las estaciones Cerrillos y Pudahuel presentan los promedios anuales más altos, con valores cercanos a 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; en cambio, Las Condes presenta el menor valor con un promedio de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. En el año 2008, El Bosque y La Florida presentan los promedios más altos (cercanos a 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), luego se ubican Cerrillos, Pudahuel, Parque O'Higgins y La Paz, con promedios cercanos a 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; Las Condes presenta un promedio de 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

La Figura 5-5 muestra el porcentaje de cumplimiento de la norma diaria y anual de MP10 durante el año 2008; aquellos casos en que se supera el valor 100% significa que se ha superado la norma respectiva fijada en $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para el percentil 98 de las concentraciones de 24h y la norma anual de MP10, que establece el valor $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para el promedio de los últimos tres años. La norma diaria tiene excedencias en Cerrillos (3%), El Bosque (8%) y Pudahuel (26%). La norma anual tiene excedencias desde 41% en Cerrillos hasta 55% en El Bosque. Pudahuel tiene un 26% de excedencia de norma diaria y un 42% de norma anual. En cambio, las concentraciones en Las Condes son un 40% inferior a la norma diaria y un 5% inferior a la norma anual

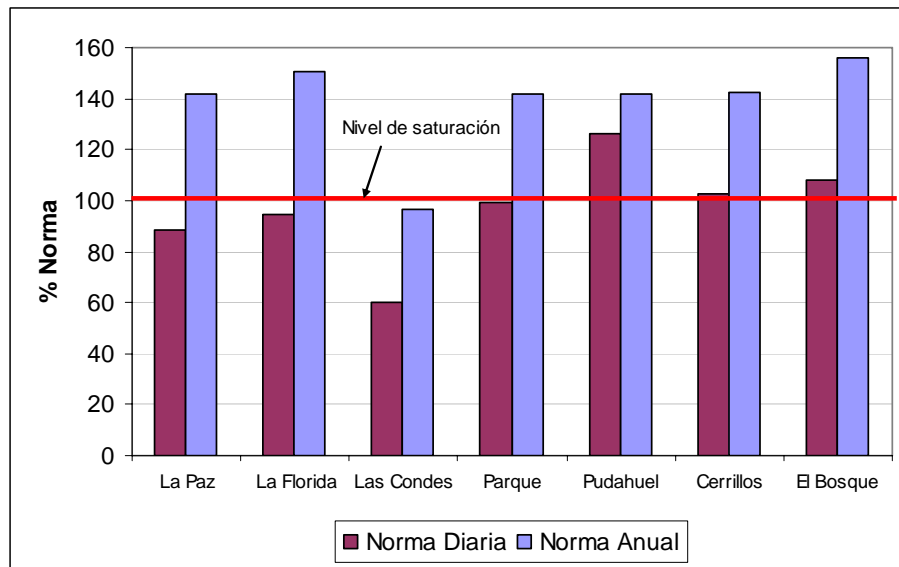


Figura 5-5 Porcentaje de normas primarias de calidad de aire para MP10 en estaciones red MACAM2 para año 2008

La Figura 5-6 presenta la evolución de los promedios anuales de MP10, fracción fina (MP2,5) y fracción gruesa (MP10-MP2,5). Cada promedio corresponde al promedio anual de todas las estaciones de la red MACAM histórica. La disminución del promedio anual de MP10 entre 1987 y 2004 está asociada a la disminución de la fracción fina, lo cual tiene un mayor beneficio en salud, ya que esta fracción es 100% respirable. El aumento de concentraciones de MP10 desde el año 2005 está asociado principalmente al mayor aumento de la fracción gruesa del material particulado respirable, el cual es mayor que la fracción fina.

La Figura 5-7 presenta la evolución de los promedios mensuales de MP10 y MP2,5 calculados para un muestreador gravimétrico (dicótomo) en las estaciones Las Condes, Parque O'Higgins y La Paz (estaciones de la red MACAM histórica) desde 1988 hasta 2007. Se aprecia un marcado ciclo anual de las concentraciones tanto de MP10 como de MP2,5 y a partir de

1994 se observan todos los promedios mensuales de MP10 bajo el límite para promedios de 24 horas fijado en $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

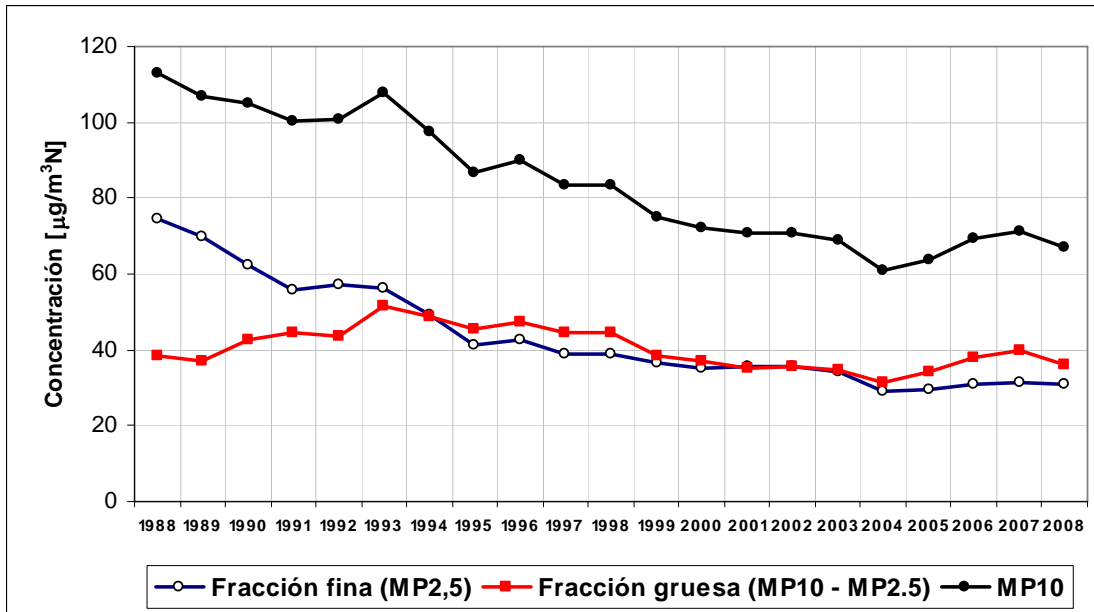


Figura 5-6 Evolución de promedios anuales de MP10 y fracciones fina y gruesa en la Red MACAM histórica, 1988-2007

De acuerdo a la Figura 5-7, entre 1988 y 2000 hay una notoria tendencia a la disminución de los máximos promedios mensuales de MP10 y MP2,5. Durante los meses de primavera-verano con temperaturas cálidas y ventilación en la cuenca de Santiago, los promedios mensuales de MP10 y MP2,5 son mucho menores que los registrados en meses de otoño-invierno, con días fríos y escasa ventilación. Sin embargo, sólo en el año 2005 se observa el valor bajo el promedio anual, para los meses de invierno.

En el año 2001 se produce un quiebre en la tendencia a la disminución, registrándose un leve aumento de los promedios máximos. Durante los años 2006 y 2007 hay un marcado aumento de los promedios máximos mensuales, el cual se revierte el año 2008. En general, los máximos promedios mensuales se alcanzan entre junio y julio. Es importante destacar que los promedios mensuales mínimos de MP10 rara vez son menores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, lo cual permite proyectar que difícilmente se cumplirá la norma anual a corto plazo. Los promedios mensuales mínimos de MP2,5 son cercanos a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, valor superior al promedio anual recomendado por la OMS.

Las estaciones de la red histórica registraron en el año 1988 un promedio mensual máximo de $172 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP10 y $124 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP2,5. En cambio, en el año 2008 el

promedio mensual máximo fue $99 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP10 y $57 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP2,5 evidenciando una reducción cercana a 42% para MP10 y a 54% para MP2,5, en 20 años.

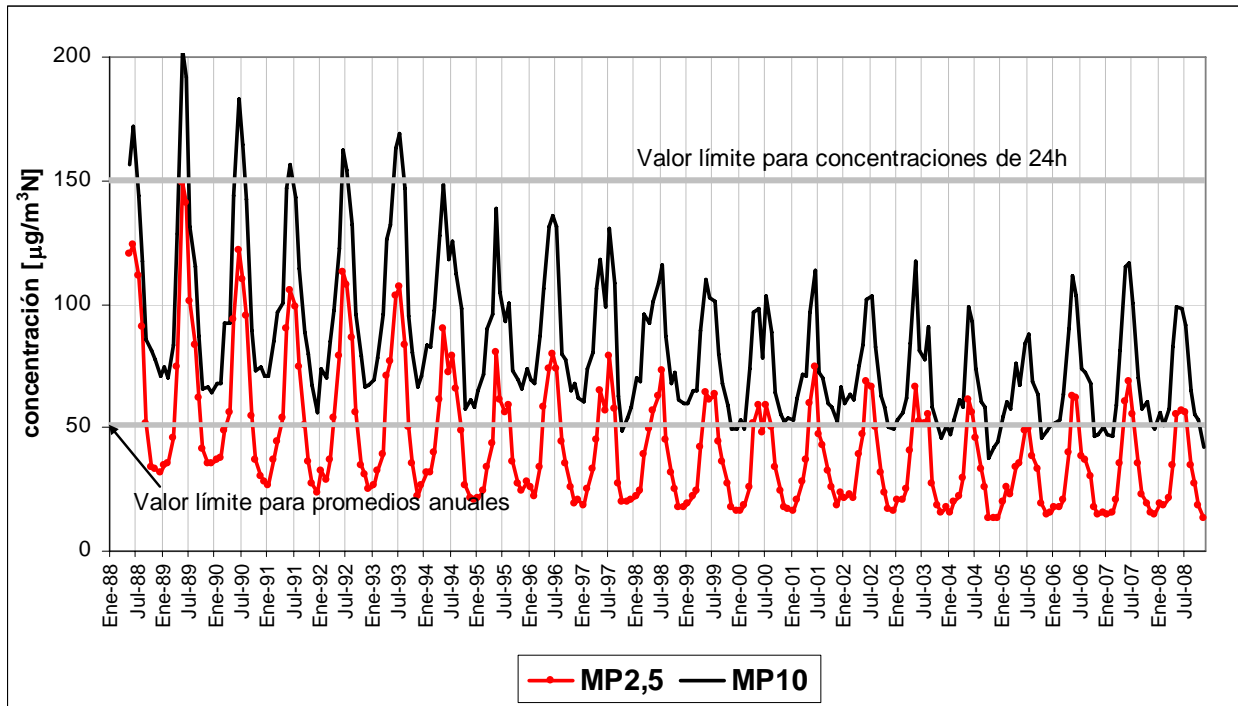


Figura 5-7 Evolución de promedios mensuales de MP2,5 y MP10. Estaciones históricas red MACAM, mediciones con dicótomo, 1988 a 2007.

Las Figuras 5-8 a) y b) muestran la comparación del ciclo promedio anual de las fracciones fina y gruesa del MP10 para los períodos 1988-1997 y 1998-2007 registrados con dicótomo en las estaciones históricas. Se aprecia un ciclo anual con aumento de las concentraciones de la fracción fina entre abril y agosto, alcanzando un máximo promedio en junio cercano a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para el período 1988-1997 y a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para el período 1998-2007; los valores mínimos corresponden a los meses de verano y son cercanos a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para el período 1998-2007. Para la fracción gruesa, durante el período 1988-1997 hay solo un suave crecimiento de las concentraciones entre abril y agosto, alcanzando máximos cercanos a $52 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ entre mayo y junio.

Para el período 1998-2007 el aumento de la fracción gruesa es menor durante el período abril-mayo alcanzando máximos cercanos a $42 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; el resto del año los promedios mensuales son cercanos a $37 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Esto implica que el aumento de las concentraciones de MP10 durante los meses de otoño-invierno se debe principalmente al aumento de la fracción fina, considerada más nociva para la salud humana. La Figura 5-8 a) muestra, además, una

disminución cercana al 40% de los valores máximos mensuales de la fracción fina durante la década de aplicación del plan de descontaminación vigente (1998-2007).

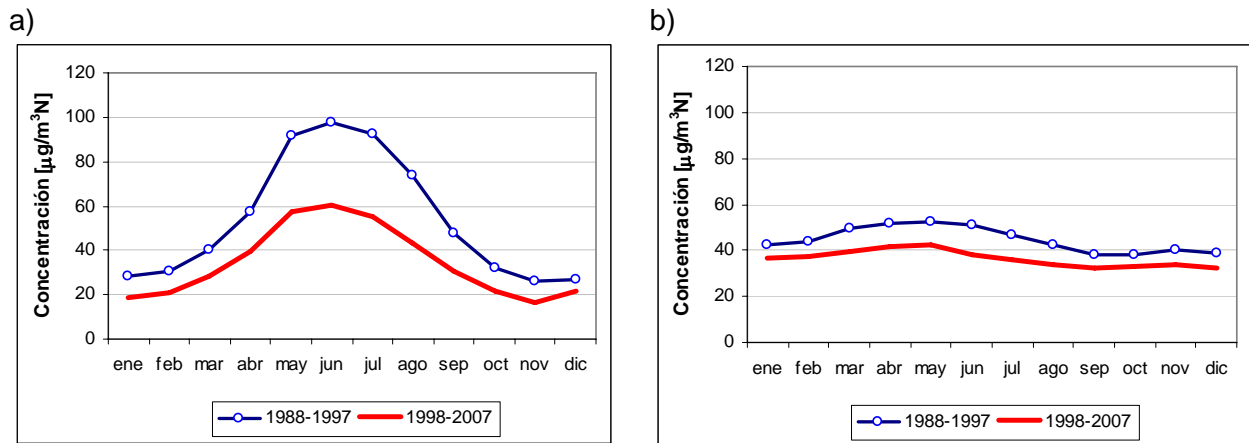


Figura 5-8 Ciclo promedio anual de fracciones a) Fracción fina y b) Fracción gruesa. Estaciones históricas red MACAM.

Las Figuras 5-9 a) y b) muestran la comparación del comportamiento de las concentraciones MP10 durante el día (ciclo diario promedio) para el período otoño-invierno (promedio de concentraciones de abril a agosto) en las estaciones de la red MACAM2 para los años 1997 (a) y 2007 (b). Para la mayoría de las estaciones, se aprecia un aumento de las concentraciones durante la mañana junto con el inicio de la actividad de la ciudad alcanzando un máximo entre las 08 y 09h. En la tarde, a las horas de mayor ventilación en la cuenca, las concentraciones disminuyen hasta valores mínimos alrededor de las 16h. Desde las 17h se produce un aumento de las concentraciones asociado al aumento del tráfico vehicular y al aumento de la estabilidad atmosférica, lo cual produce, en promedio, concentraciones máximas entre las 19 y 21h, que disminuyen paulatinamente durante la noche, hasta alcanzar un mínimo hacia las 04 y 05h.

Las Figuras 5-9 a) y b) muestran una marcada disminución de las concentraciones promedios máximos al comparar los años 1997 y 2007, especialmente en la mañana. En 1997 las concentraciones máximas durante la mañana (alrededor de las 09h) se registran en Cerrillos y Parque O'Higgins con valores cercanos a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y $205 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, respectivamente; en la noche, las concentraciones máximas ocurrieron en La Florida con $240 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, alrededor de las 19h y en Pudahuel con $215 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, alrededor de las 22h. En el año 2007, las concentraciones máximas durante la mañana (alrededor de las 09h) se registraron en El Bosque con $165 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y Pudahuel con $145 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; en la noche, las concentraciones máximas ocurren en La Florida

con $187 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ alrededor de las 21h, El Bosque con $171 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y Pudahuel con $152 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, alrededor de las 22h.

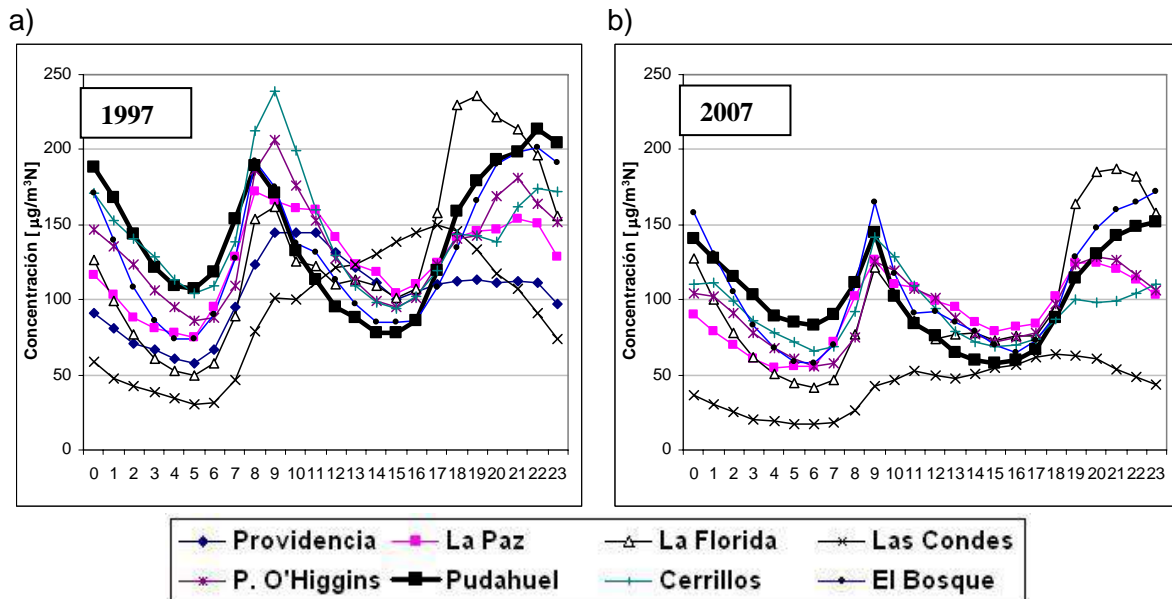


Figura 5-9 Ciclos diarios promedios de MP10 estaciones red MACAM2, período otoño-Invierno: a) año 1997; b) año 2007

Las Figuras 5-10 a) y b) muestran el ciclo diario promedio de MP10 para el período primavera-verano (promedio de enero-marzo y octubre-diciembre) en las estaciones de la red MACAM2 para los años 1997 y 2007. Se aprecia para los meses de primavera-verano un comportamiento similar del ciclo diario promedio para la mayoría de las estaciones y una notoria disminución de las concentraciones respecto a los meses de otoño-invierno, con mínimos en la madrugada y máximos en la mañana; durante la tarde en algunas estaciones hay aumento de concentraciones. Comparando 1997 con 2007 se observa una leve disminución de las concentraciones. Durante el año 1997, las máximas concentraciones promedios durante la mañana se registraron en Pudahuel y El Bosque ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 07h); en el año 2007 se alcanzaron máximos promedios cercanos a $85 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ alrededor de las 08h. Probablemente, la disminución de las concentraciones para los meses de primavera-verano entre los años 1997 y 2007 es una consecuencia de la aplicación, solamente en el período otoño-invierno de medidas adicionales para disminuir emisiones del programa de gestión de episodios de MP10 (paralización de industrias, restricción adicional, lavado de calles, mayor fiscalización, etc).

Al analizar el ciclo promedio diario de Pudahuel destacado en las Figuras 5-10 a) y b) se aprecia un aumento de las concentraciones con un máximo secundario alrededor de las 19h, lo cual difiere del comportamiento del resto de las estaciones; esta situación se mantuvo hasta el

año 2001 y su causa no está identificada. Durante los meses de verano, el ciclo diario de Pudahuel presenta concentraciones menores a las de la mayoría de las estaciones.

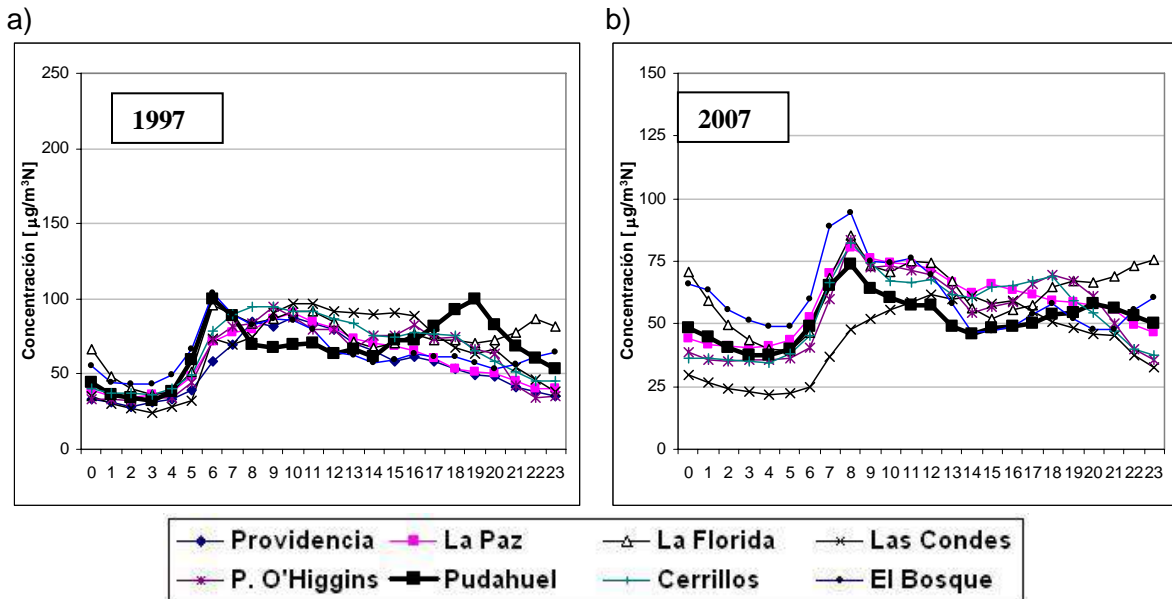


Figura 5-10 Ciclos diarios promedio de MP10 estaciones red MACAM2, período primavera-verano: a) año 1997 y b) año 2007

5.2 Comportamiento de las concentraciones de material particulado en Pudahuel

La Figura 5-11 muestra la evolución desde el año 1997 hasta el año 2008 del promedio de meses de altas concentraciones de MP10 (abril-agosto), promedio de meses de menores concentraciones (septiembre-marzo) y el promedio anual. Se aprecia el aumento de las concentraciones durante los meses de otoño-invierno (abril a agosto), el cual es casi el doble del promedio de los meses de primavera-verano. Durante los últimos 3 años, el promedio de abril-agosto de MP10 ha sido cercano a $95 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, correspondiendo a una disminución respecto a los valores de los años 1997 y 1998 que superaban $125 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, pero un aumento respecto a los valores más bajos de los años 2004 y 2005 cercanos a $82 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Los promedios de meses de primavera-verano se han mantenido por sobre el valor $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ establecido como límite en la norma anual de MP10, lo cual demuestra la necesidad de imponer medidas permanentes de reducción de concentraciones de MP10 a fin de disminuir las concentraciones hasta cumplir la norma anual.

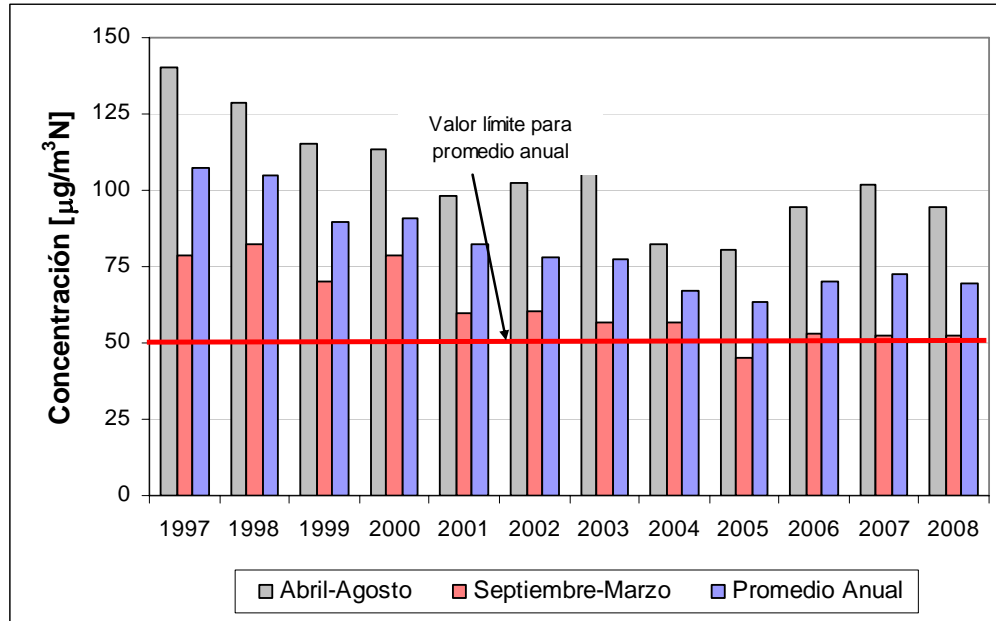


Figura 5-11 Evolución de promedios de MP10 para meses abril-agosto, septiembre-marzo y promedio anual, años 1997 a 2008

La Figura 5-12 muestra la evolución de la fracción fina y gruesa del MP10 para el promedio de los meses de abril a agosto entre los años 2001 y 2008. En general se registra un promedio similar para ambas fracciones con valores entre 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, excepto en los años 2004 y 2008 cuando la fracción fina supera por más de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a la fracción gruesa.

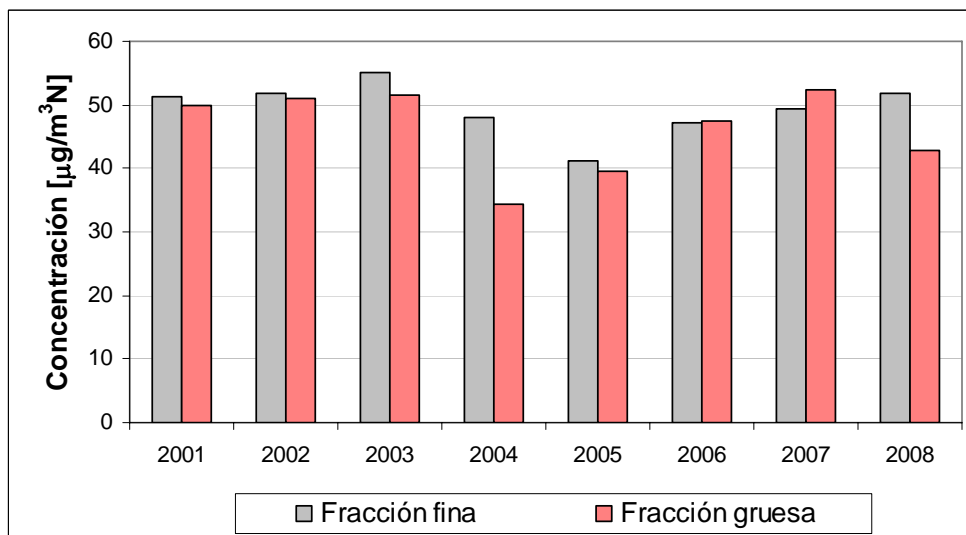


Figura 5-12 Promedio abril-agosto de fracción fina y gruesa de MP10 en Pudahuel, años 2001 a 2008

La Figura 5-13 ilustra la evolución de los promedios mensuales de MP10 y MP2,5 en la estación Pudahuel entre 1997 y 2008. Las mediciones de MP10 se inician en abril de 1997 y las de MP2,5 en mayo de 2001. Se aprecia un marcado ciclo anual, con un fuerte aumento de las concentraciones de MP10 y MP2,5 en los meses de otoño-invierno alcanzando máximos entre mayo y julio; los promedios mensuales más bajos se registran entre octubre y noviembre. Para el período 1997 a 2003 los promedios mensuales máximos de MP10 y MP2,5 son cercanos a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, respectivamente. El año 2004, el MP10 registró un máximo promedio mensual de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, que corresponde al valor más bajo desde que se realizan mediciones en Pudahuel; para el MP2,5 esta situación se presentó el año 2005, con un promedio mensual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Durante los últimos años los niveles han comenzado a aumentar nuevamente, registrándose máximos promedios mensuales de MP10 y MP2,5 de 132 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, respectivamente.

La Figura 5-14 complementa a la Figura 5-12 presentando los promedios mensuales de las fracciones fina y gruesa de MP10 en la estación Pudahuel para el período 2001 a 2008, donde la fracción fina corresponde a MP2,5 y la fracción gruesa a la diferencia de MP10-MP2,5. Para la mayoría de los años, durante los meses de primavera-verano la fracción gruesa es mayor a la fina, en cambio durante los meses de mayores concentraciones el promedio mensual de la fracción fina es similar a la gruesa, excepto durante los años 2002, 2004 y 2008 cuando hay una disminución del máximo de la fracción gruesa.

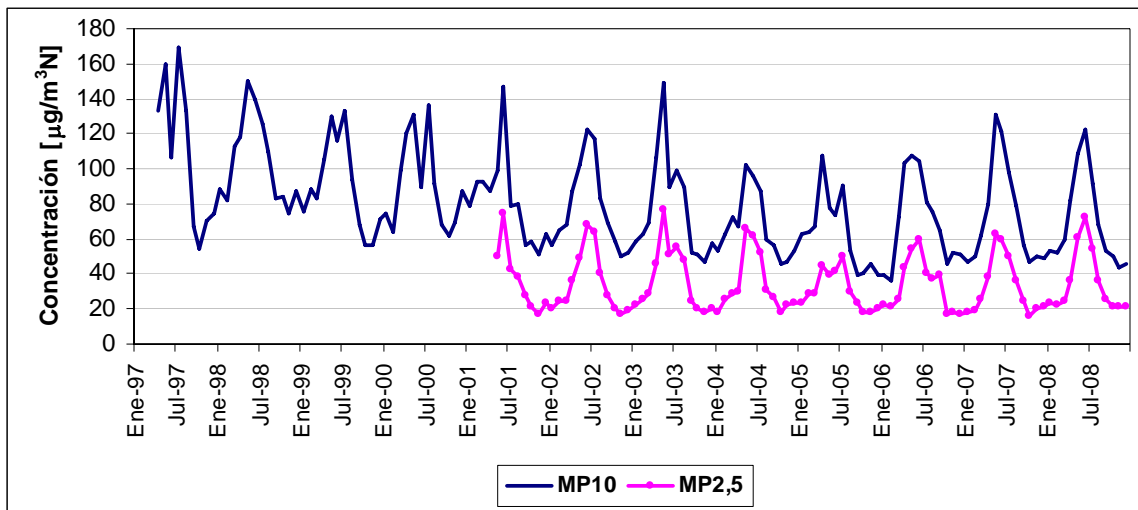


Figura 5-13 Promedios mensuales de MP10 y MP2,5, estación Pudahuel, período 1997 a 2008

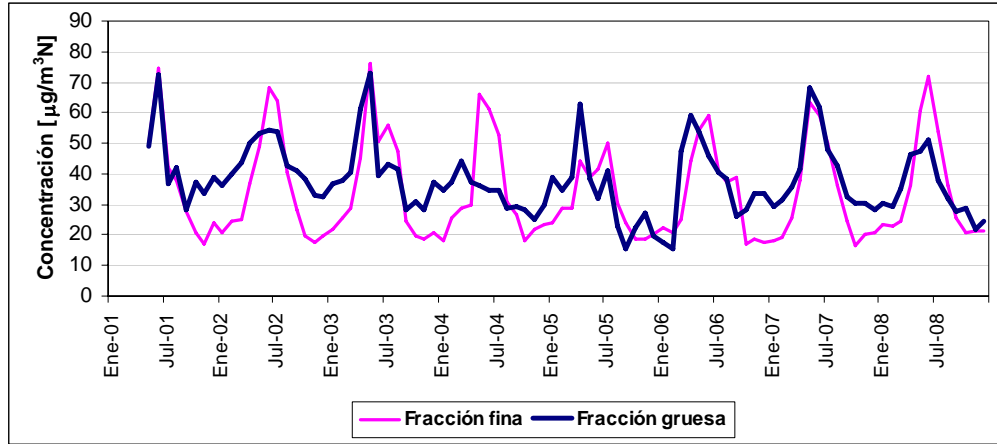


Figura 5-14 Promedios mensuales de fracciones fina y gruesa de MP10 en Pudahuel, años 2001 a 2008

La Figura 5-15 compara la fracción gruesa de Pudahuel con el promedio de las fracciones gruesas en las estaciones Independencia y P. O'Higgins apreciándose que la disminución de la fracción gruesa también se produjo en dichas estaciones, lo cual obliga a pensar en una causa regional por sobre el efecto de una causa local (efecto del mejoramiento del entorno en Pudahuel).

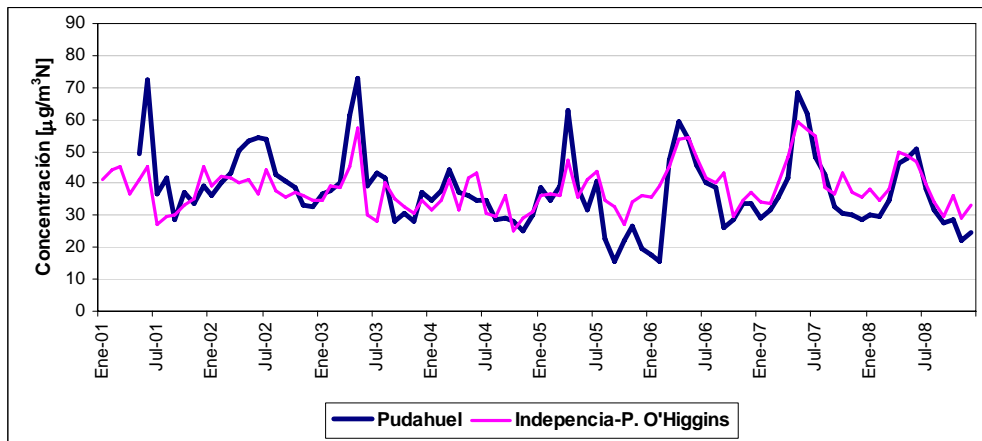


Figura 5-15 Promedios mensuales de fracción gruesa de MP10 en Pudahuel y fracción gruesa promedio Independencia-P.O'Higgins, años 2001 a 2008

El Cuadro 5-1 presenta los 11 mayores episodios o eventos de alta contaminación por MP10 en la comuna de Pudahuel, entre los años 2004 y 2007.

Cuadro 5-1 Mayores episodios de MP10 entre años 2004 y 2007 en Pudahuel

| Fecha | Máximo promedio móvil de 24h de MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Tipo episodio |
|------------|---|---------------|
| 13-06-2004 | 221 | A |
| 11-07-2004 | 231 | A |
| 16-04-2005 | 246 | A |
| 30-04-2006 | 232 | A |
| 14-06-2006 | 223 | B |
| 09-05-2007 | 226 | A |
| 12-05-2007 | 289 | B |
| 24-05-2007 | 274 | A |
| 28-05-2007 | 223 | B |
| 03-06-2007 | 246 | A |
| 29-06-2007 | 273 | A |

Destacan los episodios durante el año 2007 por sus valores, alcanzando un máximo de $289 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ el 12 de mayo, en comparación al máximo de $246 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ del 16 de abril de 2005.

Las Figuras 5-16 a) y b) presentan una comparación entre el ciclo promedio diario de abril-agosto para los años 2004 a 2007 y el ciclo diario promedio de los 11 mayores episodios ocurridos para los mismos años. Se observa una diferencia más marcada entre las concentraciones de MP10 y MP2,5 durante días de episodios y período promedio abril-agosto.

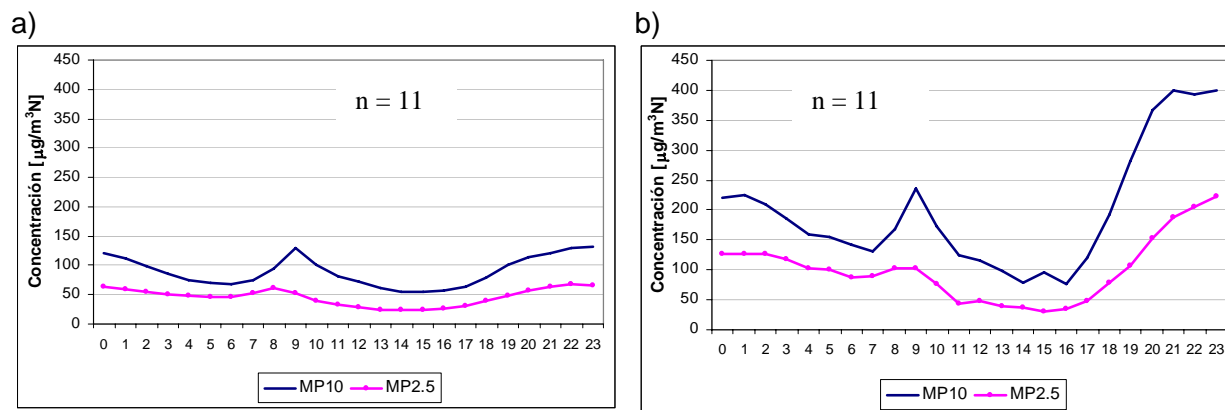


Figura 5-16 Ciclos diarios promedio de MP10 y MP2,5 en estación Pudahuel: a) para período abril-agosto entre los años 2004 y 2007; b) para los 11 mayores episodios ocurridos entre los años 2004 y 2007

El ciclo diario promedio abril-agosto presenta máximas concentraciones en la mañana y en la noche cercanas a $130 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP10 y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP2,5. En cambio, para días de episodios hay un aumento a todas horas del día, alcanzando un máximo en la mañana cercano a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP10 y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP2,5; durante la tarde las concentraciones disminuyen hasta $90 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para MP10 y MP2,5,

respectivamente. A partir de las 17h hay un brusco aumento de las concentraciones alcanzado un máximo promedio de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ de MP10 y 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ de MP2,5, entre las 21 y 23h. Durante la madrugada las concentraciones disminuyen.

La Figura 5-17 presenta un análisis del perfil diario de las concentraciones de las fracciones fina y gruesa del MP10 para días de episodio. Los valores corresponden a las concentraciones promedio de 48h para los 11 mayores episodios entre 2004 y 2007. Se aprecia, para ambas fracciones, un brusco crecimiento desde las 17h, pero con mayores concentraciones de la fracción fina que alcanza un máximo a medianoche cercano a 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; a su vez, la fracción gruesa alcanza el máximo entre las 20h y 21h con un valor, un poco menor, cercano a 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

Durante la madrugada ambas fracciones disminuyen sus concentraciones, pero la fracción fina mantiene mayores valores, disminuyendo hasta 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 07h, en circunstancias que la fracción gruesa disminuye hasta 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 06h. Durante la mañana siguiente, producto del inicio de la actividad en la ciudad y del aumento de las emisiones vehiculares, se produce un aumento de las concentraciones de la fracción fina alcanzando 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 07h y un fuerte aumento de las concentraciones de la fracción gruesa que alcanza un valor de 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 08h. Pasado el máximo de la mañana, ambas fracciones inician un descenso de sus concentraciones hasta los valores mínimos durante la tarde, cercanos a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, para la fracción fina y a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para la fracción gruesa.

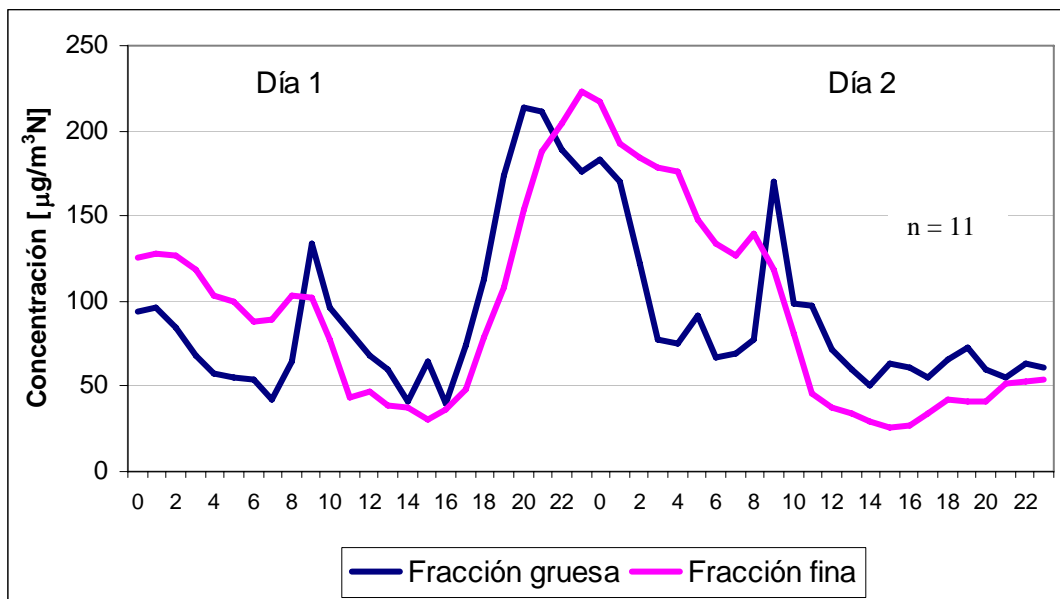


Figura 5-17 Perfil para 24 h de las concentraciones de las fracciones fina y gruesa del MP10 para días de episodio. Valores promedio para 48h para los 11 mayores episodios entre 2004 y 2007

Es necesario destacar que la mayoría de los episodios analizados finalizan con una advección costera (aumento de la ventilación, aumento de la altura de la capa de mezcla superficial e ingreso de aire húmedo costero) que produce la disminución de las concentraciones.

Las Figuras 5-18 a 5-20 ilustran el ciclo diario promedio para MP10, velocidad del viento y temperatura, respectivamente, para los meses de abril a agosto entre los años 2004 y 2007, distinguiendo entre días laborales (lunes a viernes) y días de fin de semana (sábado y domingo).

La Figura 5-18 muestra un comportamiento similar de las concentraciones de MP10, pero diferencias en los valores alcanzados, para las 3 situaciones indicadas. Los días lunes a viernes y el día sábado tienen un máximo matinal, alrededor de las 09h, cercano a $135 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, valor que disminuye el día domingo hasta $105 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Para los días lunes a viernes, el máximo matinal corresponde a la mayor concentración del día. Durante la tarde las concentraciones disminuyen con valores similares entre días lunes a viernes y sábado, pero en la noche a pesar de tener un aumento similar entre las 15h y 19h, los días sábados y domingos alcanzan mayores concentraciones desde las 20h hasta la madrugada del día siguiente. Durante la noche, las mayores concentraciones se registran el día sábado con un valor promedio de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ a las 23h, seguido del día domingo con $137 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; en cambio para los días lunes a viernes el máximo valor nocturno es de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en promedio.

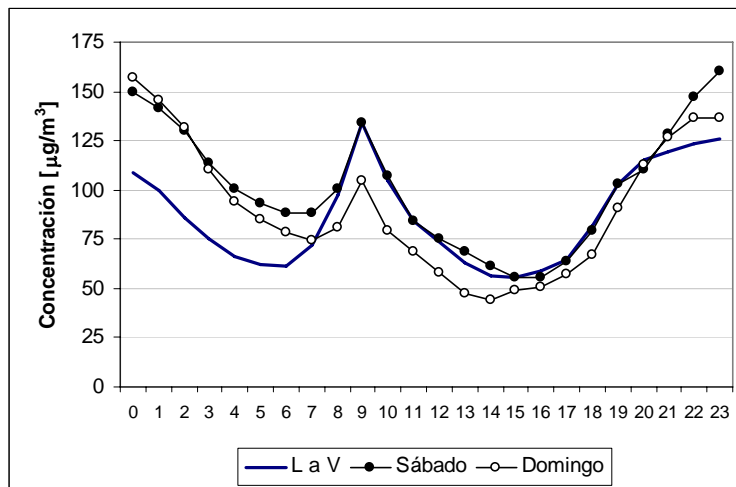


Figura 5-18 Ciclo diario de concentraciones de MP10 para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007.

El Cuadro 5-2 presenta la distribución de episodios según el tipo de día de la semana. En el caso de los episodios tipo A, los cuales generalmente coinciden con mayores

concentraciones en Pudahuel, se presentan 41 casos de lunes a viernes lo que equivale a un promedio de 8 episodios, es decir es mayor que los 5 episodios registrados durante los días sábado y los 4 casos durante días domingo. Situación similar ocurre para los episodios tipo BPF. Luego, el aumento de las concentraciones durante las noches de fines de semana no estaría relacionado con los episodios.

Cuadro 5-2 Distribución de episodios según el tipo de día de la semana

| Episodio | Lunes a Viernes | Sábado | Domingo |
|----------|-----------------|--------|---------|
| A | 41 | 5 | 4 |
| BPF | 31 | 3 | 4 |
| Total | 72 | 8 | 8 |

Para temperatura y velocidad de viento, las Figuras 5-19 y 5-20 muestran que no hay una variación significativa del ciclo diario promedio durante los distintos días de la semana. Por lo tanto, las variaciones en el comportamiento promedio de las concentraciones durante días de semana y fin de semana son independientes de las variables meteorológicas, siendo la causa más probable las variaciones en los niveles de emisiones locales de MP10 en la comuna de Pudahuel.

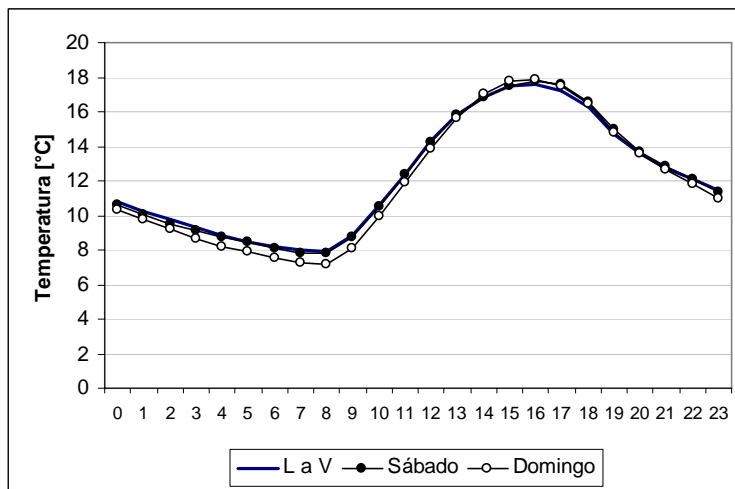


Figura 5-19 Ciclo diario de temperatura de MP10 para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007.

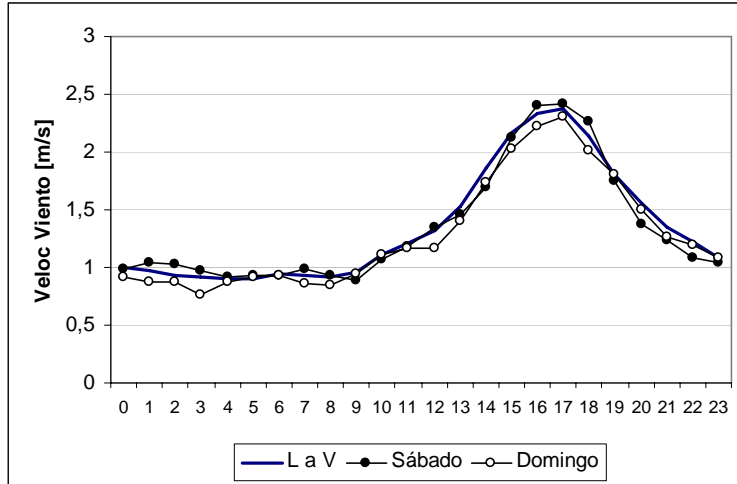


Figura 5-20 Ciclo diario de velocidad de viento para distintos tipos de días, período abril-agosto de los años 2004 a 2007.

5.3 Extensión geográfica del área de concentraciones elevadas durante episodios de contaminación atmosférica en Pudahuel

5.3.1 Campaña CENMA 1999

La Figura 5-21 muestra una comparación de las concentraciones diarias de MP10 obtenidas en la Municipalidad, La Farfana y la estación Pudahuel para el período 3 de agosto a 11 de septiembre de 1999.

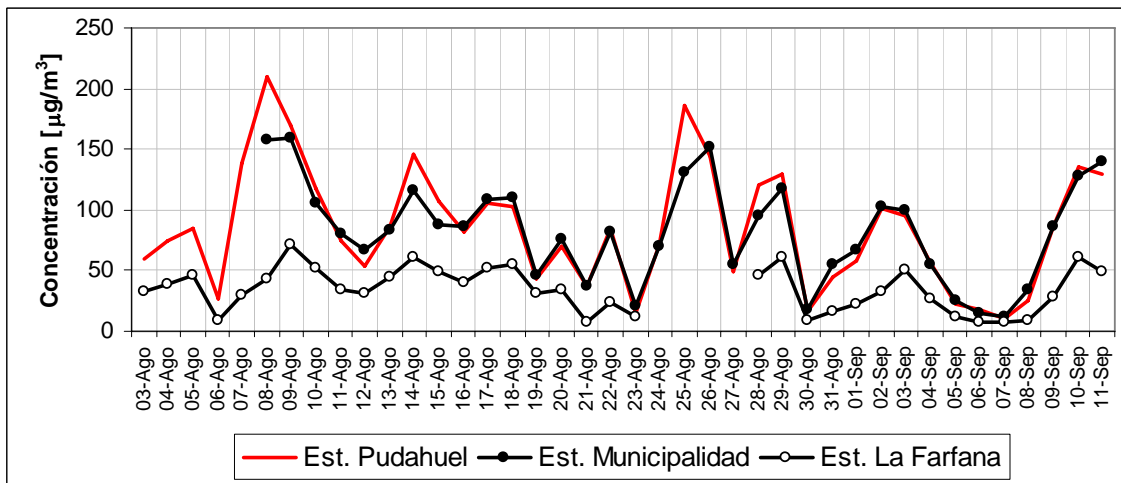


Figura 5-21 Concentraciones diarias de MP10 entre agosto y septiembre de 1999

Los resultados muestran concentraciones diarias similares entre la estación en la Municipalidad y la estación Pudahuel para la mayoría de los días; no obstante, los días 8, 14, 25 y 28 de agosto alcanzaron mayores concentraciones en Pudahuel que en la Municipalidad.

Por su parte, las concentraciones diarias en La Farfana son aproximadamente un 50% menores al valor registrado en Pudahuel. Es posible que en los días de episodios del período abril-julio ocurra una situación similar o incluso aumente la diferencia entre Pudahuel y la Municipalidad. En promedio, la concentración de MP10 obtenida en la Municipalidad para el período fue de 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, esto es un 3% menor respecto al promedio de la estación Pudahuel con 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. A su vez, en la estación ubicada en el sector La Farfana, el promedio de las concentraciones de MP10 fue de 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, es decir un 60% menor respecto a la estación de monitoreo en Pudahuel.

La Figura 5-22 presenta el ciclo diario promedio de MP10 de las estaciones Pudahuel, La Farfana y Municipalidad para el mes de agosto de 1999. Se aprecia un ciclo diario bastante similar para las estaciones Pudahuel y Municipalidad, con un máximo secundario en la mañana, descenso de concentraciones en la tarde y un aumento hasta un máximo principal en la noche. Sin embargo, los máximos en la estación Pudahuel son mayores, especialmente el nocturno, que alcanzó un valor promedio de 161 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; en la Municipalidad el máximo nocturno fue de 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Durante la tarde, las concentraciones en la Municipalidad son mayores que en Pudahuel, probablemente por mayor actividad al interior del recinto. En la estación ubicada en La Farfana el ciclo diario muestra valores parejos con un leve aumento de concentraciones alrededor del mediodía y un máximo cercano a 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

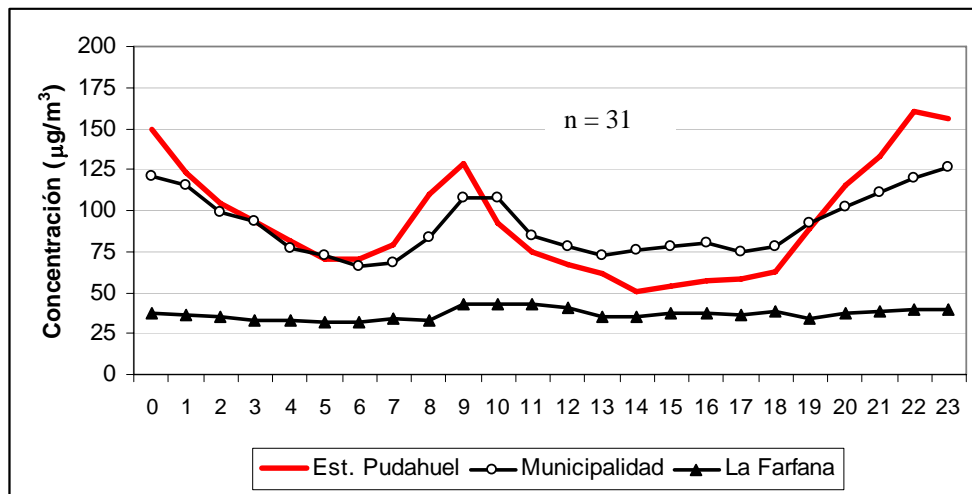


Figura 5-22 Ciclos diarios promedio de MP10, agosto de 1999

Lo anterior muestra la existencia de una variabilidad espacial de las concentraciones en la zona de Pudahuel, incluso dentro de la zona de representatividad poblacional de la estación (radio de 2 km) que no depende de las condiciones meteorológicas, sino de condiciones locales de los sitios estudiados. Durante los días en los cuales se supera el valor fijado en la norma

diaria de MP10 en la estación Pudahuel, en el sector de la Municipalidad, a un kilómetro de distancia, las concentraciones están en el rango “Bueno” y a distancias mayores, en el área suburbana (La Farfana) todos los días tienen concentraciones en el rango “Bueno”.

5.3.2 Campaña CENMA 2003

El detalle de los recorridos, horarios, concentraciones en la estación Pudahuel y tipo de episodio asociado se presenta en el Cuadro 5-3.

Cuadro 5-3 Concentraciones promedio de MP10 en estación Pudahuel y tipo de episodio para los días muestreados durante el período 10 de julio a 1 de septiembre de 2003.

| Día | Hora Inicio | Hora Término | Tipo de recorrido | N° de vueltas | Promedio 20-23h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio 23-02h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio día ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Tipo de Episodio |
|------------|-------------|--------------|-------------------|---------------|--|--|---|------------------|
| Jue 10-Jul | 20:21 | 1:21 | 1 | 1 | 465 | 391 | 211 | A |
| Lun 14-Jul | 20:18 | 1:53 | 1 | 1 | 133 | 96 | 54 | |
| Mar 15-Jul | 20:27 | 1:58 | 1 | 1 | 307 | 261 | 122 | A |
| Mié 16-Jul | 19:53 | 2:01 | 1 | 1 | 83 | 105 | 126 | |
| Vie 18-Jul | 19:59 | 2:03 | 1 | 1 | 328 | 190 | 131 | B |
| Jue 24-Jul | 19:52 | 1:59 | 1 | 1 | 126 | 134 | 106 | |
| Vie 25-Jul | 20:23 | 23:56 | 2 | 1 | 68 | 76 | 104 | |
| Lun 28-Jul | 19:55 | 1:40 | 2 | 2 | 230 | 191 | 110 | |
| Mar 29-Jul | 20:02 | 1:54 | 2 | 2 | 313 | 329 | 164 | A |
| Sáb 02-Ago | 20:02 | 1:52 | 2 | 2 | 56 | 81 | 84 | |
| Mié 06-Ago | 20:11 | 1:59 | 2 | 2 | 200 | 135 | 110 | |
| Vie 08-Ago | 20:01 | 2:00 | 2 | 2 | 334 | 395 | 149 | A |
| Sáb 09-Ago | 20:09 | 1:53 | 2 | 2 | 283 | 323 | 222 | A |
| Vie 15-Ago | 20:04 | 2:12 | 2 | 2 | 116 | 163 | 94 | B |
| Dom 24-Ago | 20:25 | 1:56 | 2 | 2 | 90 | 134 | 98 | |
| Lun 25-Ago | 20:21 | 1:59 | 2 | 2 | 128 | 176 | 103 | |
| Lun 01-Sep | 20:22 | 1:58 | 2 | 2 | 102 | 115 | 83 | |

En general, las concentraciones horarias de MP10 medidas entre las 20h y 23 h son mayores que las medidas entre las 23h y 02 h del día siguiente. En forma consistente se encontraron valores altos de MP10 en el sector del río Mapocho y Costanera, los que podrían estar asociados a quemas locales (leña, cartones, neumáticos, etc) para calefacción domiciliaria y levantamiento de polvo desde calles en mal estado por la circulación de vehículos. Las mediciones confirmaron los resultados de la campaña de 1999, en el sentido de tener menores concentraciones en la Municipalidad de Pudahuel que en la estación Pudahuel de la Red MACAM2 durante la noche. Además, las concentraciones de MP10 registradas en el entorno de la estación Cerro Navia resultaron mayores a las registradas en el entorno de la estación Pudahuel, situación consistente con las mayores concentraciones de MP10 que se registran en la estación Cerro Navia de la red MACAM2, respecto de las registradas en la estación

Pudahuel.

El Cuadro 5-4 presenta un resumen de las concentraciones promedios obtenidas en las estaciones Pudahuel y Cerro Navia para el período de campaña de monitoreo del 10 de julio al 1º de septiembre de 2003 entre la 20h y 23h y entre las 23h y 02h, además del promedio diario.

Cuadro 5-4 Concentraciones promedios de MP10 en estaciones Pudahuel y Cerro Navia entre el 10 julio y el 1 de septiembre de 2003.

| Estación Pudahuel | | | Estación Cerro Navia | | | Observaciones |
|--|--|---|--|--|---|------------------|
| Promedio 20-23h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio 23-02h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio día ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio 20-23h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio 23-02h ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | Promedio día ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) | |
| 340 | 340 | 174 | 382 | 361 | 187 | Episodios tipo A |
| 222 | 176 | 113 | 382 | 361 | 187 | Episodios tipo B |
| 197 | 194 | 122 | 239 | 220 | 141 | Todos los días |

Las Figuras 5-23 a 5-26 presentan la distribución espacial de las concentraciones promedio de MP10 durante días de episodios tipo A y tipo BPF, separadas según los horarios de la clasificación propuesta por Muñoz *et al.* (2003), referente a episodios tempranos y tardíos.

La Figura 5-23 muestra la distribución espacial de las concentraciones promedio de MP10 entre las 20h y 23h durante días de episodio temprano (Muñoz *et al.*, 2003) con configuración meteorológica tipo A para 5 recorridos. Se aprecia un aumento de las concentraciones hacia el sector norte de la estación de Pudahuel, cercana al río Mapocho, alcanzando concentraciones promedio de $700 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; en esta zona se detectaron quemaduras y polvo levantado desde las calles por la circulación de vehículos.

En el entorno de la estación Pudahuel las concentraciones promedio bordean los $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y en el entorno de la estación Cerro Navia son cercanas a $400 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. La zona de la Municipalidad tiene concentraciones de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Las concentraciones de MP10 tienden a disminuir hacia la zona sur de Pudahuel.

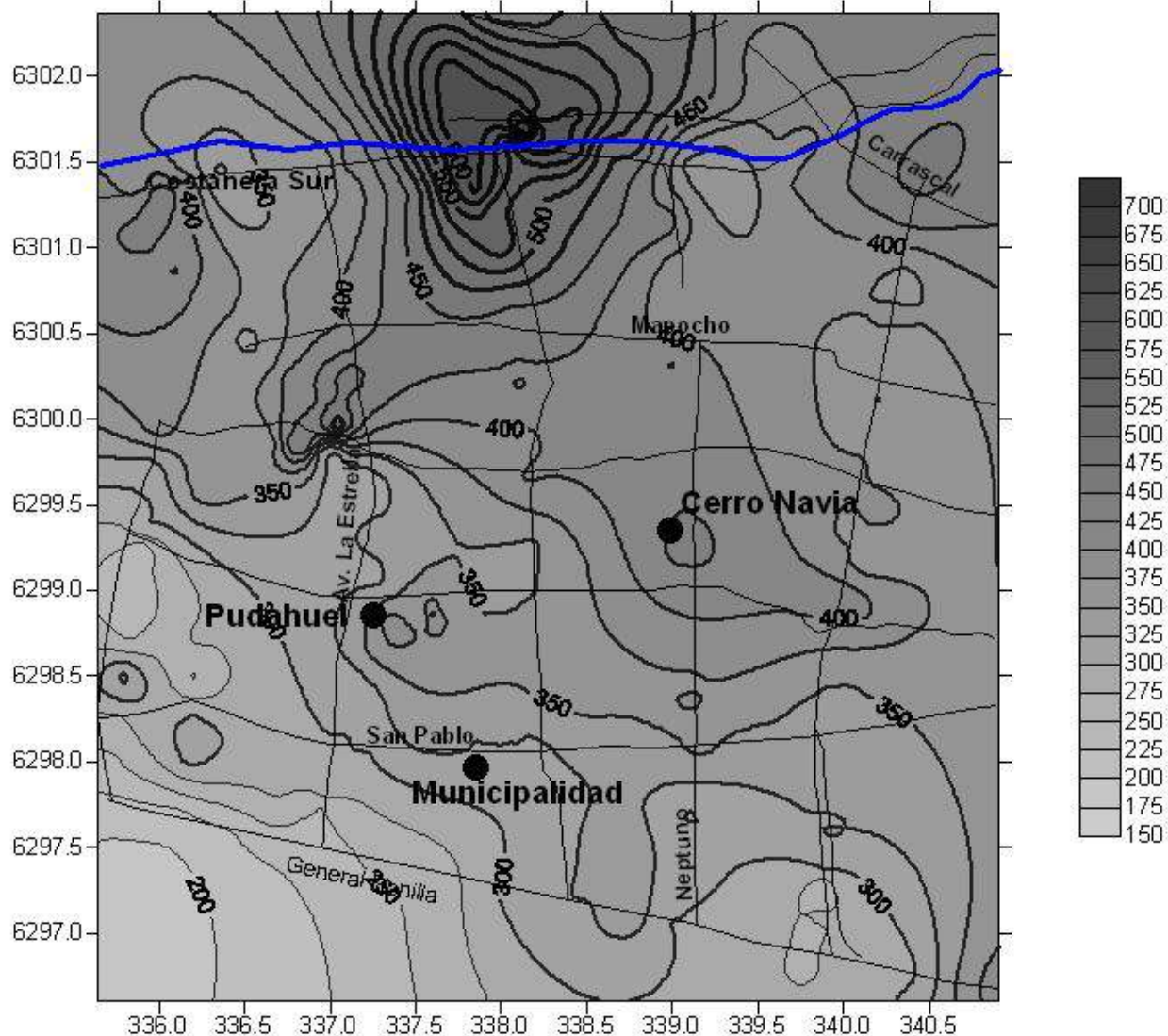


Figura 5-23 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 20 y 23 horas, durante episodios tipo A entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003.

La Figura 5-24 muestra la distribución espacial de las concentraciones promedio de MP10 entre 23h y 02h durante días de episodio tardío (Muñoz *et al.*, 2003) con configuración meteorológica tipo A para 5 recorridos. Se aprecia un descenso de las concentraciones en toda el área estudiada respecto al lapso 20h a 23h, con máximos en la zona del río Mapocho de 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y valores cercanos a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y 275 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en la estación Pudahuel y la Municipalidad, respectivamente. El entorno de la estación Cerro Navia tiene mayores concentraciones que la estación Pudahuel.

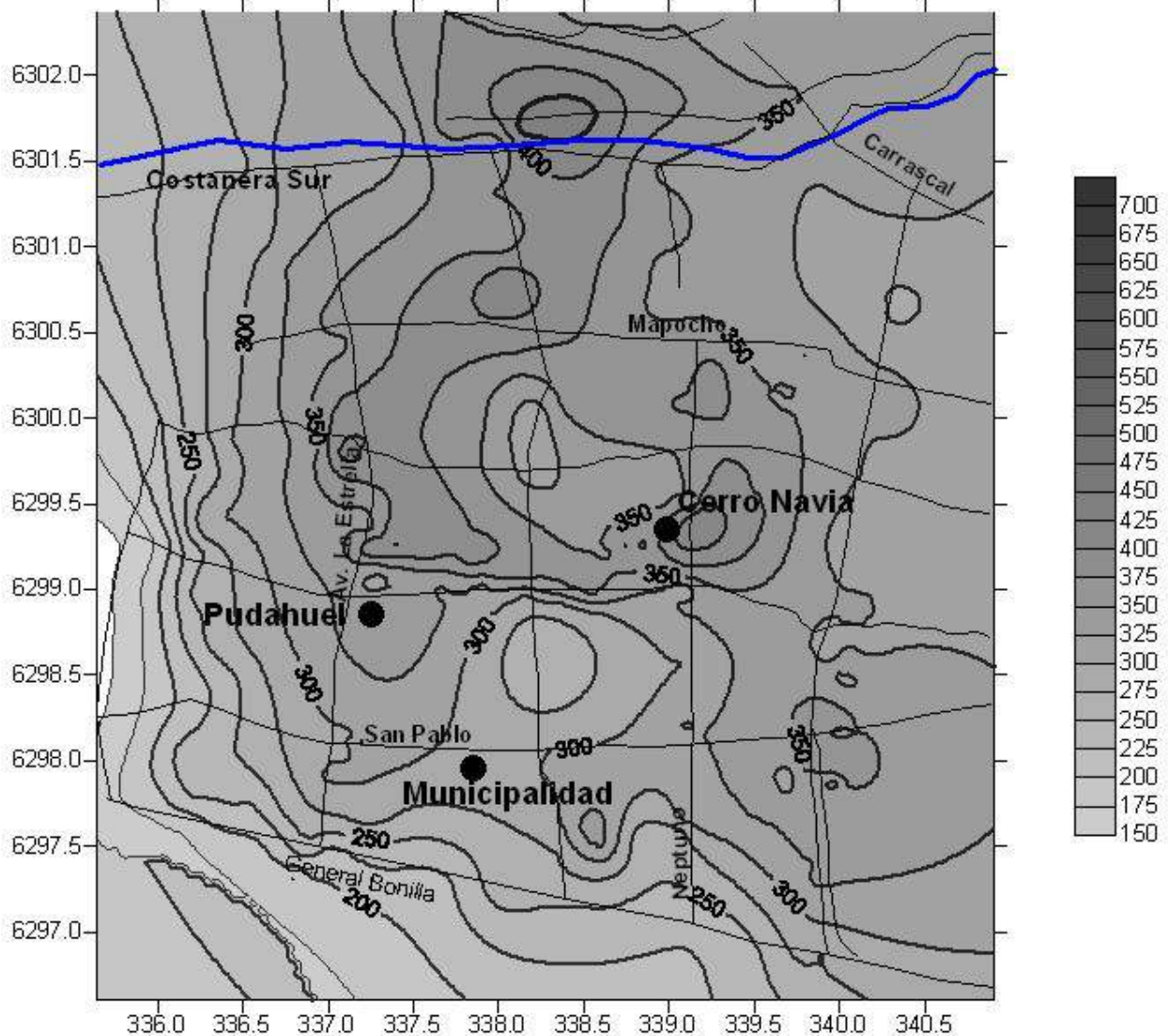


Figura 5-24 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 23h y 02h horas, durante episodios tipo A entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003.

La Figura 5-25 muestra la distribución de concentraciones promedio de MP10 durante días de episodio temprano (Muñoz *et al.*, 2003) con configuración meteorológica tipo BPF para las 20h a 23 horas. Se aprecia una disminución de las concentraciones horarias de MP10 respecto a las registradas en episodios tipo A para las 20 a 23 horas.

A diferencia de los días de episodio tipo A, en los días de episodios tipo BPF los máximos de MP10 entre las 20 y 23h se ubican en la zona norponiente de Pudahuel, alcanzando concentraciones máximas cercanas a $550 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en sectores aledaños al río Mapocho a unos 2 km de la estación Pudahuel, zona en la cual las concentraciones promedios horarias son aproximadamente de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ disminuyendo hacia los sectores ubicados al

surponiente de la estación, alcanzando concentraciones cercanas a $225 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en la zona de la Municipalidad. Además, dentro de las zonas de altas concentraciones aparecen áreas, en forma de islas, con menores concentraciones lo cual podría atribuirse en parte, a las diferencias de nivel en el terreno y a condiciones locales de microescala.

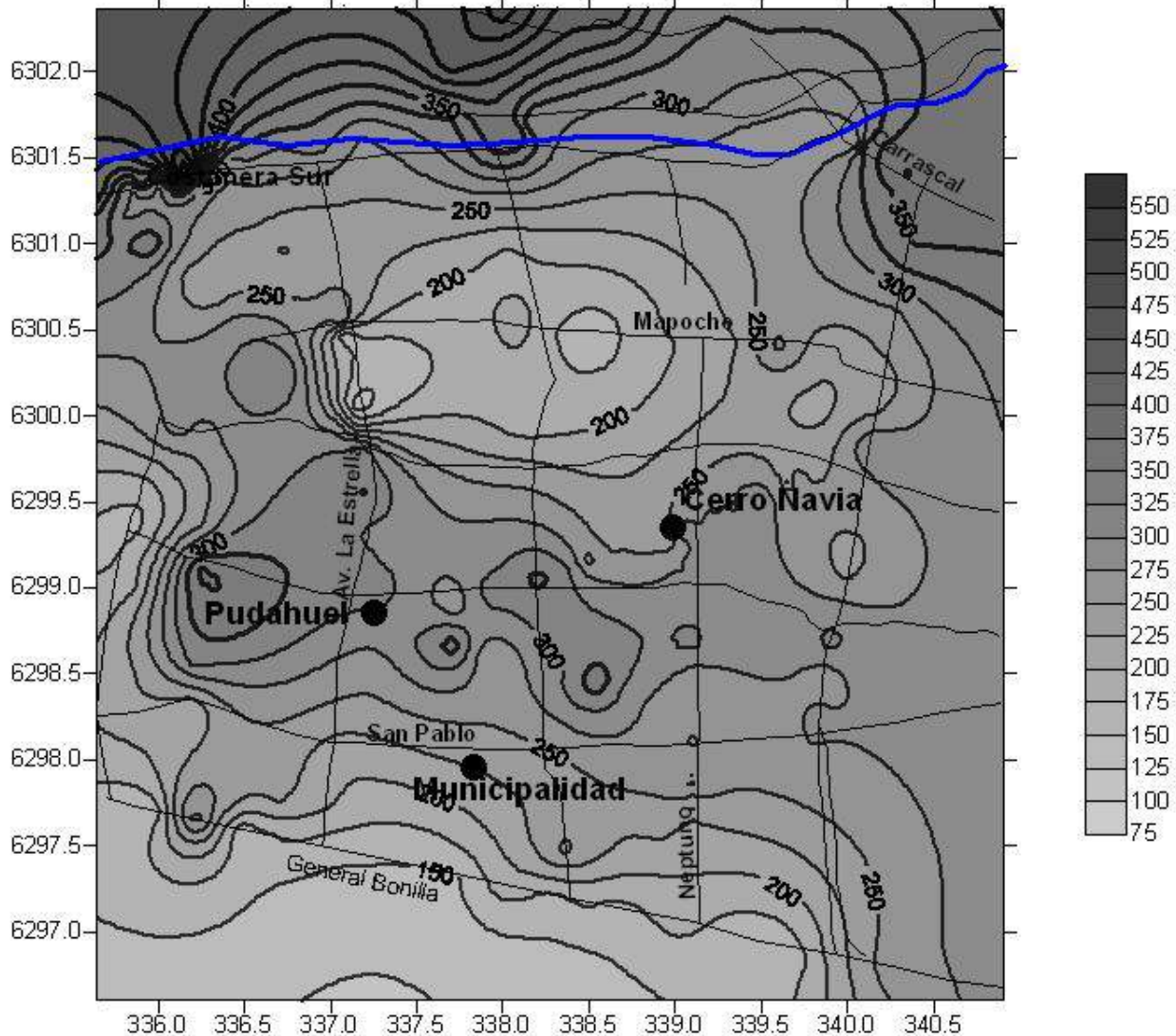


Figura 5-25 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 20 y 23 horas durante episodios tipo BPF entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003.

La Figura 5-26 muestra la distribución de concentraciones horarias promedio entre las 23 y 02h durante días de episodio tardío (Muñoz *et al.*, 2003) con configuración meteorológica tipo BPF. Se aprecia una disminución de las concentraciones horarias promedio de MP10 respecto a las registradas entre las 20 y 23h, así como también respecto a las concentraciones registradas en episodios tipo A.

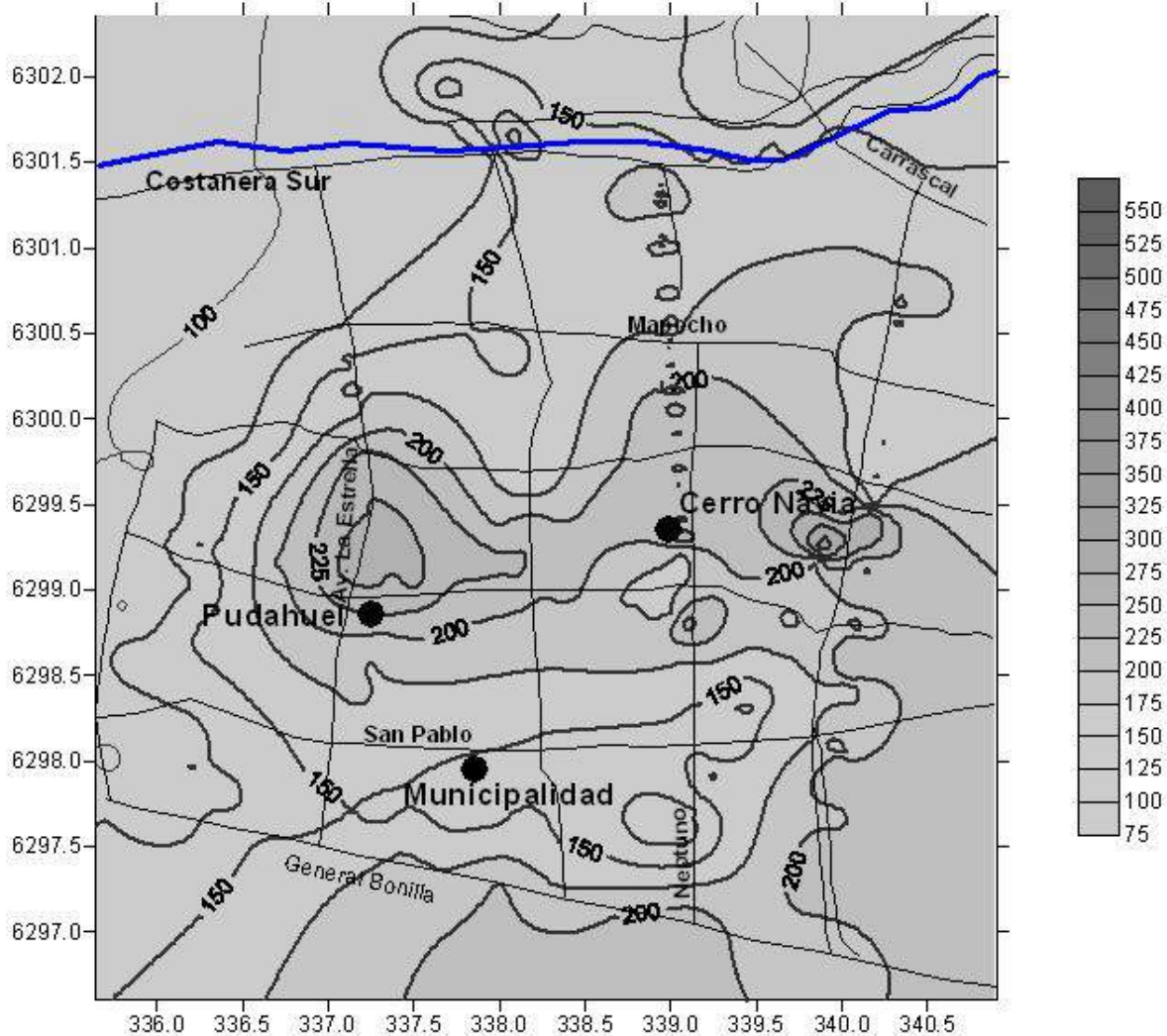


Figura 5-26 Distribución espacial de concentraciones promedio de MP10 entre 23 y 02 horas durante episodios tipo BPF entre el 25 julio y 1° septiembre de 2003.

Las concentraciones más altas se aprecian en el entorno de las estaciones Pudahuel y Cerro Navia, con valores máximos promedio horarios cercanos a $225 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en la estación Pudahuel y a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en una zona ubicada a 1 km al oriente de la estación Cerro Navia. La zona aledaña al río Mapocho presenta menores concentraciones que en el período 20 a 23h, registrando valores entre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ y $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, que son concentraciones similares a las registradas en la zona de la Municipalidad de Pudahuel.

Los resultados de la campaña muestran que las concentraciones de MP10 para el período 20 a 23h son mayores que las concentraciones del período 23 a 02h, lo cual es distinto a lo obtenido por Muñoz *et al.* (2003) donde los episodios tardíos alcanzaban las mayores concentraciones de MP10. La diferencia se produce al no comparar los mismos términos, ya

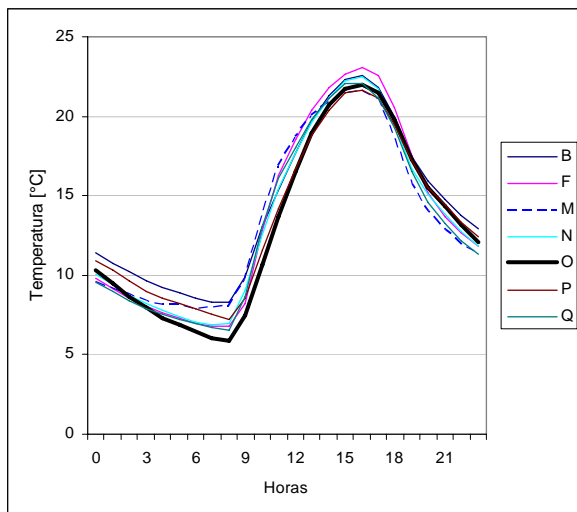
que el valor promedio para los períodos 20 a 23h y 23 a 02h no separa entre episodios tempranos y tardíos. Además, Muñoz *et al.* (2003) considera promedios de concentraciones horarias, en cambio la presente tesis utilizó el promedio de 4 horas. Por último, puede influir el período de muestreo, ya que durante el año 2003, el mayor número de días de episodios de altas concentraciones de MP10 se produjo en el mes de mayo y no durante el período de la campaña.

5.4 Comparación de las variables meteorológicas en el área urbana de Santiago durante días de episodio

Durante los años 2004 a 2007 en Santiago se registraron 50 episodios tipo A y 38 episodios tipo BPF (CENMA, 2008). La estación Pudahuel presentó 28 veces las concentraciones más altas durante episodios tipo A (equivale a un 56%) y solamente 4 veces para los episodios tipo BPF (equivale a un 11%).

El análisis entre las variables meteorológicas medidas en las estaciones de la red MACAM2 para días de episodio tipo A muestra para temperatura y humedad relativa fuertes similitudes entre los valores registrados en la estación Pudahuel (estación O) y el resto de las estaciones, excepto la estación las Condes para humedad relativa. Esta situación se aprecia en la comparación de los ciclos diarios de la Figura 5-27 y en la obtención de los coeficientes de correlación cercanos a 1 presentados en el Cuadro 5-5, los cuales fueron calculados para una muestra de 1200 observaciones y un nivel de significancia de 5% (para un intervalo de confianza de 95%).

a)



b)

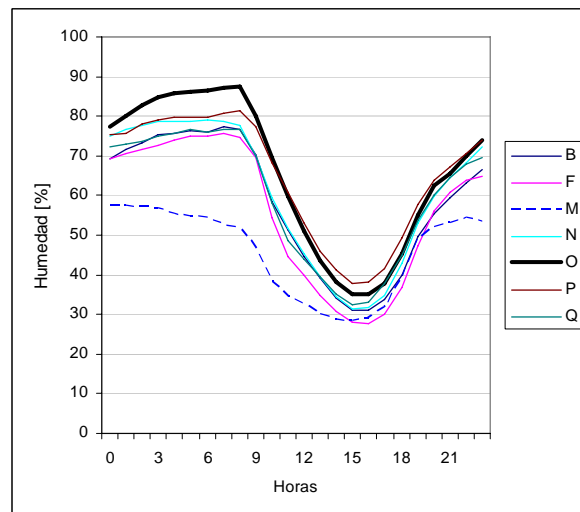


Figura 5-27 Comparación de ciclos diarios de a) temperatura y b) humedad relativa para días de episodios tipo A entre 2004 y 2007 en estaciones de la red MACAM2.

En cambio, para la velocidad y dirección del viento hay diferencias entre Pudahuel (estación O) y el resto de las estaciones, lo cual se puede apreciar en la comparación de los ciclos diarios y de direcciones predominantes a las horas de mayor concentración (entre las 18 y 23h), situación presentada en la Figura 5-28.

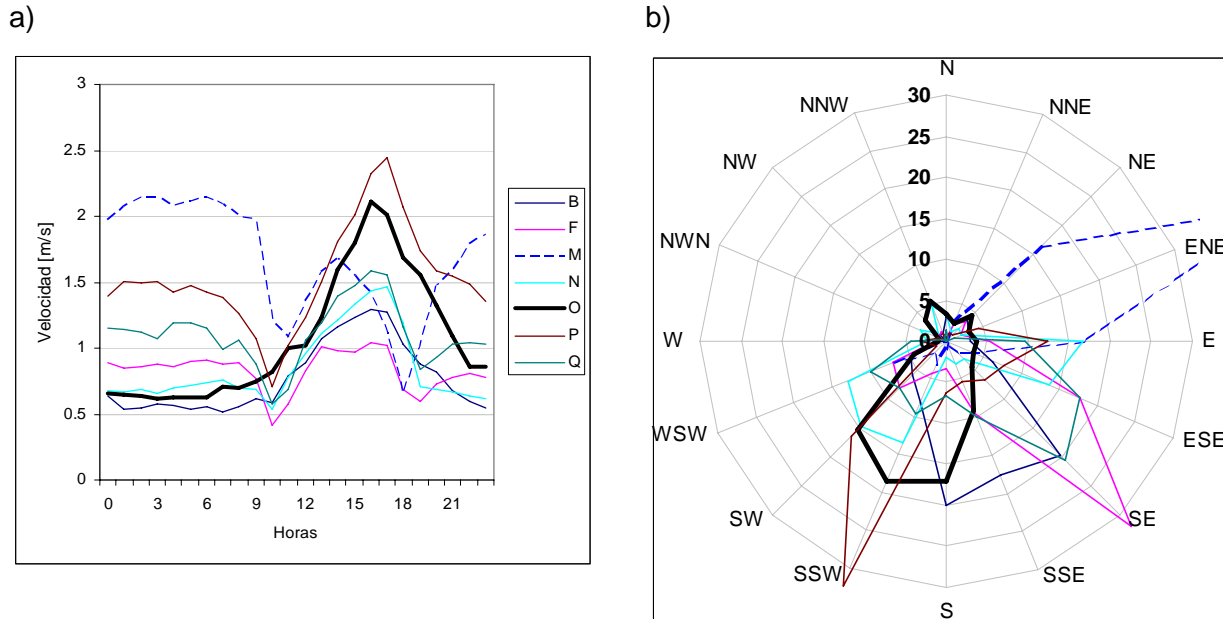


Figura 5-28 Comparación de a) ciclos diarios de velocidad de viento y b) direcciones predominantes durante horas de altas concentraciones (18 a 23h) para 50 días de episodios tipo A entre 2004 y 2007 en estaciones de la red MACAM2.

La comparación de los coeficientes de correlación para velocidad de viento presentada en el Cuadro 5-5 con niveles de significancia de 5% (intervalo de confianza de 95%) y 1200 observaciones para cada una de las estaciones, muestran una correlación de -0,25 entre la estación Pudahuel y la estación Las Condes y valores entre 0,43 y 0,69 al correlacionar Pudahuel con el resto de las estaciones de la red MACAM2. Para dirección de viento, los coeficientes de correlación entre Pudahuel y el resto de las estaciones son menores a 0,4.

Cuadro 5-5 Coeficiente correlación entre estación Pudahuel y resto de estaciones de la red MACAM2 durante 50 episodios tipo A

| | Humedad | Temperatura | Veloc. Viento | Direc. Viento |
|--------------|---------|-------------|---------------|---------------|
| La Paz | 0,94 | 0,99 | 0,69 | 0,26 |
| La Florida | 0,93 | 0,97 | 0,11 | 0,26 |
| Las Condes | 0,68 | 0,92 | -0,25 | 0,21 |
| P. O'Higgins | 0,96 | 0,99 | 0,64 | 0,32 |
| Cerrillos | 0,94 | 0,99 | 0,63 | 0,34 |
| El Bosque | 0,93 | 0,98 | 0,43 | 0,25 |

(n=1200 observaciones, 5% de nivel de significancia, intervalo de confianza de 95%)

Al relacionar los valores horarios de las variables meteorológicas con las concentraciones horarias de MP10 se aprecia en todas las estaciones una relación inversa entre la velocidad de viento y MP10; cuando la velocidad de viento disminuye aumentan las concentraciones de MP10 y viceversa. En cambio, para temperatura, humedad relativa y dirección del viento no se encontró una relación definida. La Figura 5-29 ilustra la relación entre el MP10 y las variables meteorológicas registradas en la estación Pudahuel mediante gráficos de dispersión; para el resto de las estaciones de la red MACAM2 existe un comportamiento del MP10 con variables meteorológicas similar al observado en Pudahuel.

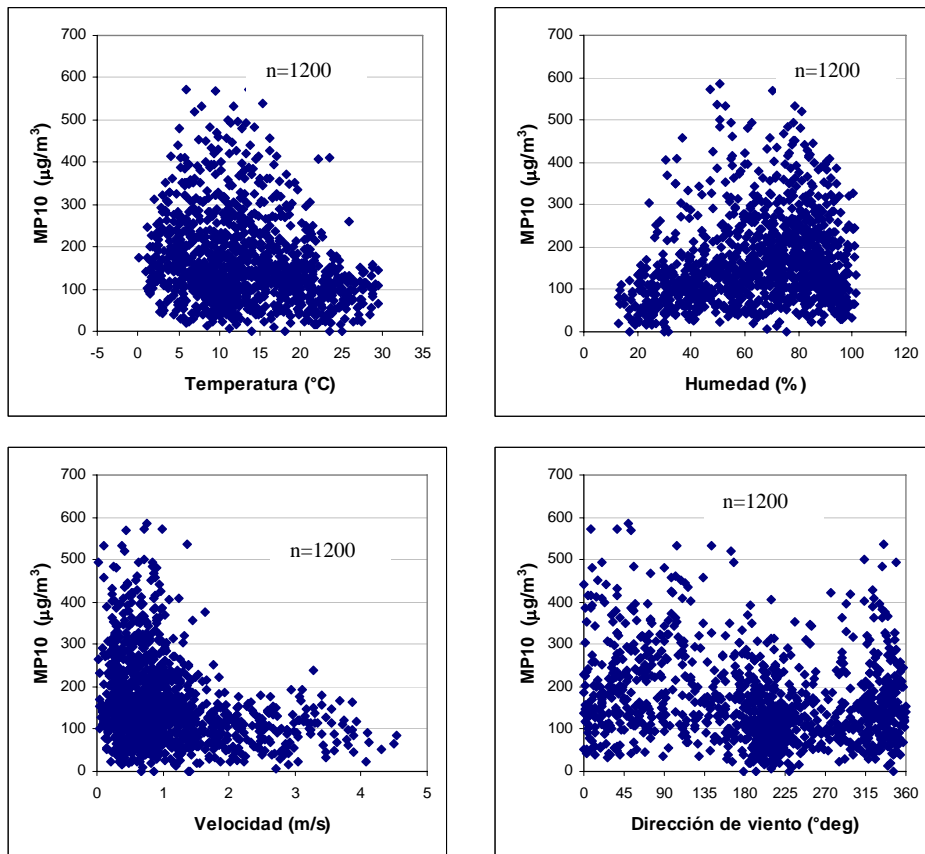


Figura 5-29 Dispersión de concentraciones horarias de MP10 con variables meteorológicas para 50 días de episodio tipo A en estación Pudahuel, años 2004 a 2007

Considerando que la variable velocidad del viento tiene una incidencia importante en el comportamiento de las concentraciones de MP10 y que existen diferencias entre los valores de velocidad de viento registrados en Pudahuel y en el resto de las estaciones se realizó un análisis estadístico para probar si dicha diferencia es estadísticamente significativa. El análisis estadístico incluyó los episodios tipo A y BPF.

El Cuadro 5-6 resume los resultados del análisis estadístico descriptivo realizado a la velocidad del viento registrada en las estaciones Pudahuel, La Florida, Las Condes, Parque O'Higgins y El Bosque para 50 días de episodio tipo A y 38 días de episodio tipo BPF. La Figura 5-30 ilustra gráficamente la distribución de las velocidades de viento, apreciándose los valores extremos en Las Condes y Pudahuel.

Cuadro 5-6 Resumen del análisis estadístico descriptivo de la velocidad del viento para los días de episodios tipo A y tipo BPF, años 2004 a 2007

| ESTADÍSTICO | PUDAHUEL | | LA FLORIDA | | LAS CONDES | | PARQUE | | EL BOSQUE | |
|---------------------|----------|-----|------------|-----|------------|-----|--------|-----|-----------|-----|
| | A | BPF | A | BPF | A | BPF | A | BPF | A | BPF |
| Media | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 1,7 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 1,1 | 0,9 |
| Mediana | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 1,7 | 1,2 | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 0,9 |
| Máximo | 4,5 | 5,4 | 2,3 | 2,4 | 4,7 | 6,1 | 2,8 | 3,6 | 3,2 | 3,8 |
| Mínimo | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Desviación estándar | 0,8 | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| N° de observaciones | 1200 | 912 | 1200 | 912 | 1200 | 912 | 1200 | 912 | 1200 | 912 |

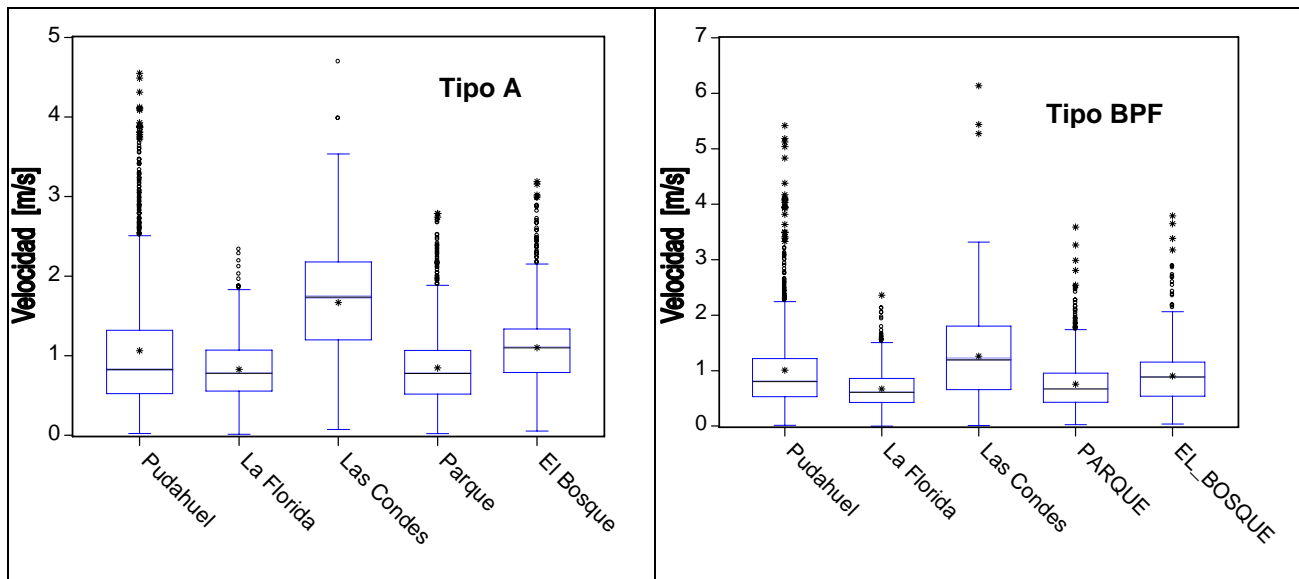


Figura 5-30 Distribución de velocidades de viento para cada estación, episodios tipo A y tipo BPF, años 2004 a 2007

Los resultados de las pruebas estadísticas realizadas para probar que la velocidad del viento medida en la estación de Pudahuel es distinta de la velocidad del viento en el resto de las estaciones se resumen en el Cuadro 5-7 para los episodios tipo A y en el Cuadro 5-8 para los episodios tipo BPF. Las pruebas de igualdad de medianas según los test Wilconxon/Mann.Whitney, Kruskal-Wallis y Chi-cuadrado muestran con claridad que la hipótesis de igualdad de mediana es rechazada en todos los casos a un nivel de significancia de 5% o

incluso al 1%, producto de los valores **p** cercanos a cero, excepto para la comparación entre Pudahuel y El Bosque para días de episodio tipo BPF donde la igualdad se rechaza al 10%. Este resultado es coherente con el obtenido por Gramsch et al. (2006) que clasificó las estaciones de la red MACAM2 para monitoreo de MP10 en 5 grupos quedando la estación Pudahuel sola en uno de ellos.

Adicionalmente, la correlación de velocidad de viento entre Pudahuel y el resto de las estaciones para días de episodio tipo A y tipo BPF presentadas en el Cuadro 5-9 muestran correlaciones muy bajas reafirmando los resultados arrojados por los test de hipótesis sobre igualdad de medianas. Es decir, el viento en Pudahuel es distinto al viento en las otras estaciones de la red MACAM2 para días de episodios.

Cuadro 5-7 Resultados los test estadísticos para la velocidad del viento durante 50 días de episodio tipo A, años 2004 a 2007

| Método de Testeo | Grados de Lib. | Pudahuel – La Florida | | Pudahuel - Las Condes | | Pudahuel - Parque | | Pudahuel – El Bosque | |
|----------------------------------|----------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------|---------|----------------------|---------|
| | | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor |
| Wilcoxon/Mann-Whitney | | 3,540954 | 0,0004 | 20,2908 | 0 | 4,079186 | 0 | 8,199375 | 0 |
| Wilcoxon/Mann-Whitney (tie-adj.) | | 3,540954 | 0,0004 | 20,2908 | 0 | 4,079186 | 0 | 8,199377 | 0 |
| Med. Chi-square | 1 | 5,226667 | 0,0222 | 487,8047 | 0 | 6,826667 | 0,009 | 116,16 | 0 |
| Adj. Med. Chi-square | 1 | 5,041667 | 0,0247 | 486,003 | 0 | 6,615 | 0,0101 | 115,2817 | 0 |
| Kruskal-Wallis | 1 | 12,53856 | 0,0004 | 411,7177 | 0 | 16,64 | 0 | 67,23024 | 0 |
| Kruskal-Wallis (tie-adj.) | 1 | 12,53857 | 0,0004 | 411,7178 | 0 | 16,64 | 0 | 67,23027 | 0 |

Cuadro 5-8 Resultados de los test estadísticos para la velocidad del viento durante 38 días de episodio tipo BPF, años 2004 a 2007

| Método de Testeo | Grados de Lib. | Pudahuel – La Florida | | Pudahuel - Las Condes | | Pudahuel - Parque | | Pudahuel – El Bosque | |
|----------------------------------|----------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------|---------|----------------------|---------|
| | | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor | Estadígrafo | p-valor |
| Wilcoxon/Mann-Whitney | | 10,06306 | 0 | 8,863941 | 0 | 6,957917 | 0 | 0,212546 | 0,0817 |
| Wilcoxon/Mann-Whitney (tie-adj.) | | 10,06306 | 0 | 8,863942 | 0 | 6,957917 | 0 | 0,212546 | 0,0817 |
| Med. Chi-square | 1 | 80,84211 | 0 | 101,3707 | 0 | 31,57895 | 0 | 5,929825 | 0,0149 |
| Adj. Med. Chi-square | 1 | 80,00219 | 0 | 100,4299 | 0 | 31,05482 | 0 | 5,703947 | 0,0169 |
| Kruskal-Wallis | 1 | 101,2661 | 0 | 78,57023 | 0 | 48,41322 | 0 | 0,045195 | 0,0816 |
| Kruskal-Wallis (tie-adj.) | 1 | 101,2662 | 0 | 78,57026 | 0 | 48,41323 | 0 | 0,045195 | 0,0816 |

Cuadro 5-9 Matriz de correlación entre la velocidad del viento en Pudahuel y el resto de las estaciones de la red MACAM2 para los 50 días de episodios tipo A y 38 BPF, años 2004 a 2007.

| | Tipo A | Tipo BPF |
|------------|--------|----------|
| LA FLORIDA | 0,11 | 0,19 |
| LAS CONDES | -0,25 | -0,06 |
| PARQUE | 0,64 | 0,59 |
| EL BOSQUE | 0,43 | 0,40 |

El ciclo de velocidad de viento en las estaciones está influenciado por la topografía local, las estaciones que presentan un comportamiento con mayor diferencia a Pudahuel, estación ubicada en una zona baja de la ciudad a 481 msnm, corresponden a las estaciones Las Condes (781 msnm) y La Florida (604 msnm) ubicadas en sectores cercanos al pie de montaña y que reciben la brisa que desciende desde la cordillera hacia la ciudad (Ulriksen, 1993). La Figura 5-31 ilustra la ubicación de las estaciones en una imagen 3D.

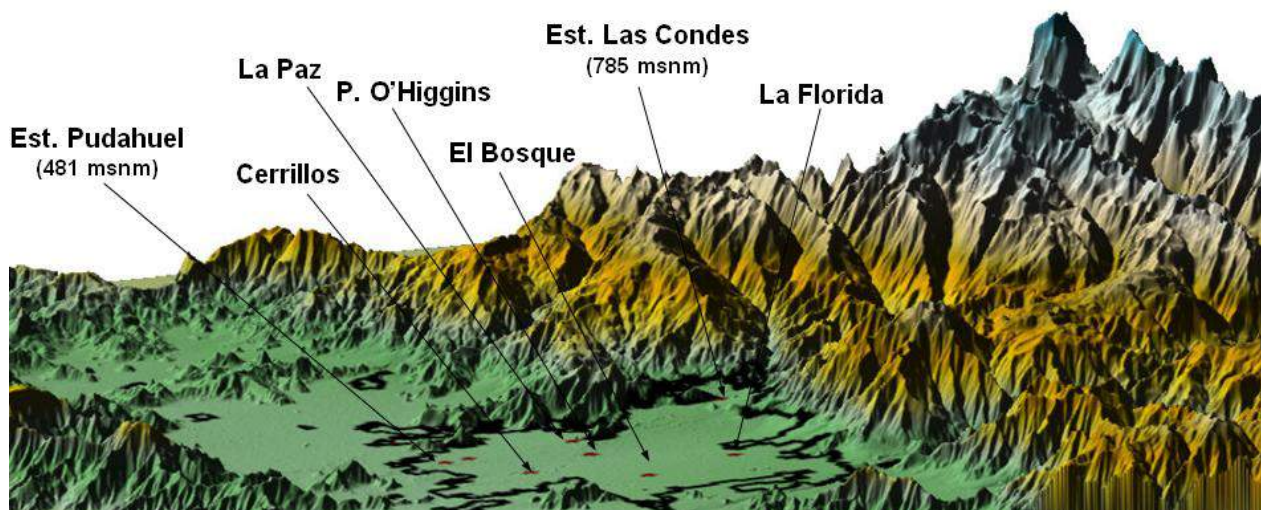


Figura 5-31 Vista 3D de la ubicación de las estaciones de la red MACAM2.

Fuente: Elaborado con información topográfica de Global Digital Elevation Model

Las Figuras 5-32 (a) y (b) muestran que el ciclo diario de velocidad de viento en las estaciones del sector oriente (Las Condes y La Florida) es distinto al ciclo diario de la zona centro-sur (El Bosque) y poniente (Pudahuel) para los días de episodios tipo A y tipo BPF, durante los cuales las concentraciones diarias de MP10 en Pudahuel son mayores al valor límite de la norma.

En Las Condes y La Florida el ciclo diario está influenciado por flujos locales de viento asociado al calentamiento de las laderas cordilleranas, el cual produce cambios en las direcciones de viento y disminución de la intensidad alrededor de las 10h y 18h siendo más intenso en Las Condes donde se alcanzan mayores velocidades durante la madrugada y noche

influenciado por el enfriamiento de las laderas cordilleranas (brisa montaña-valle). En cambio, durante la noche y madrugada en Pudahuel y El Bosque se registran las menores velocidades alcanzando las máximas durante la tarde, una hora antes de la mínima intensidad en Las Condes.

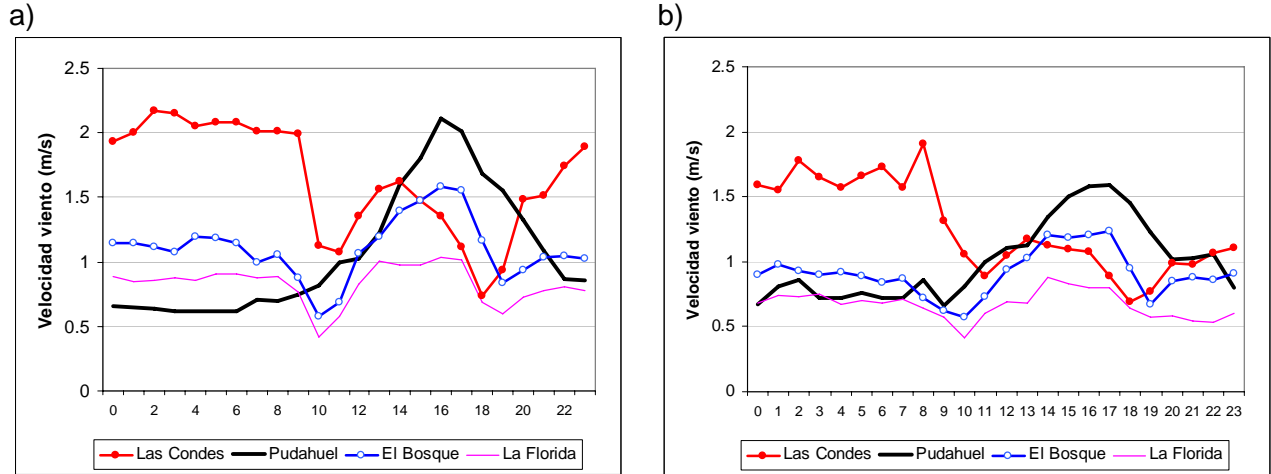


Figura 5-32 Ciclo diario promedio de velocidad de viento (2004 a 2007) en Las Condes, La Florida, El Bosque y Pudahuel para 35 días de episodios tipo A (a) y 19 días tipo BPF (b).

En la estación Pudahuel, durante las tardes de días de episodio tipo A se alcanzan velocidades de viento mayores que en las tardes de días de episodio tipo BPF, situación similar ocurre en Las Condes y El Bosque. En la estación Las Condes se registran velocidades más altas en días de episodio tipo A, especialmente desde las 18h coincidiendo con el inicio de altas concentraciones en Pudahuel de acuerdo a lo ilustrado en la Figura 5-33.

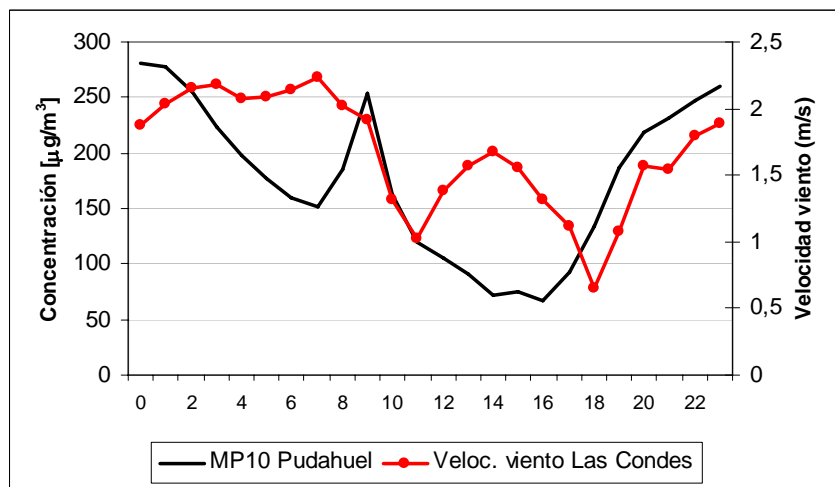


Figura 5-33 Comparación de ciclos diarios promedio entre MP10 en Pudahuel y velocidad de viento en Las Condes para 50 días de episodios tipo A entre 2004 y 2007.

La Figura 5-34 ilustra las direcciones predominantes de viento en las estaciones de la red MACAM2 a las horas de mayor concentración de MP10 (entre las 18 y 23h) durante días de episodio tipo A.

Las direcciones de viento presentadas para días de episodio tipo A muestran claramente flujo de aire hacia la zona de la estación Pudahuel en Las Condes y La Florida. En las estaciones Cerrillos y El Bosque también se aprecia dirección de viento hacia el sector de Pudahuel, pero con mayor dispersión lo cual es producto de velocidades menores respecto a las producidas en Las Condes y La Florida que ayudan a tener un flujo de viento más definido. En cambio, en la estación Pudahuel, la componente predominante es Suroeste aunque con velocidades de viento débiles, cercanas a 0,8 m/s.

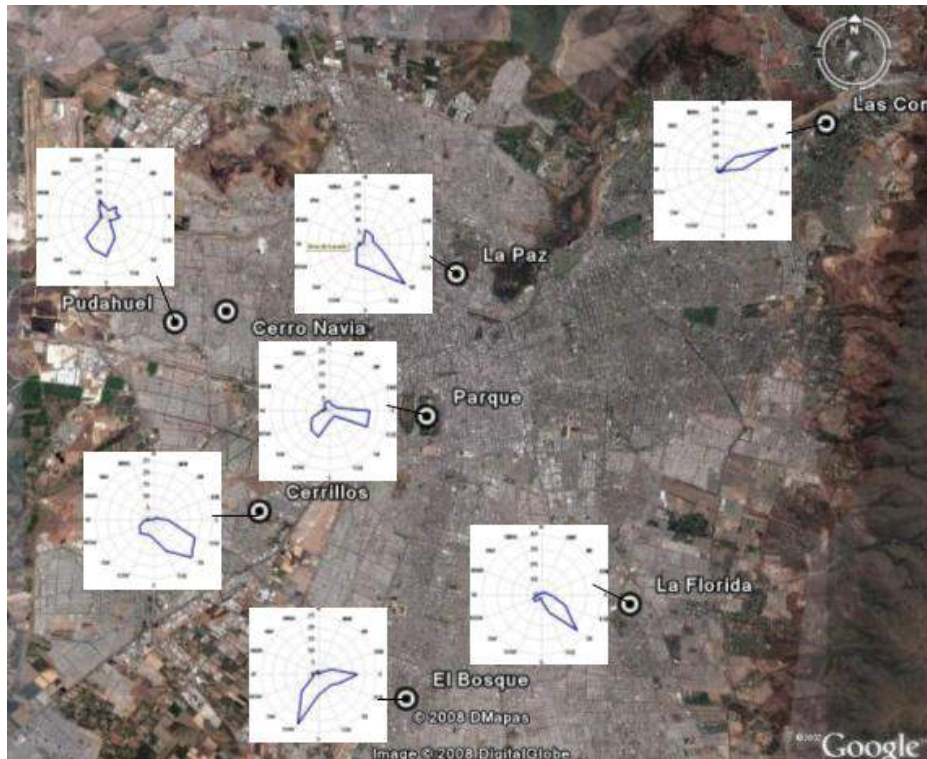


Figura 5-34 Direcciones predominantes del viento para días de episodio Tipo A, a las horas de mayor concentración de MP10 (18 a 23h) en estaciones de la red MACAM2, 2004 a 2007

La Figura 5-35 muestra para días de episodio tipo BPF, que la velocidad y dirección del viento es hacia la zona de Pudahuel en Las Condes y La Florida, situación similar a días de episodios tipo A, pero con menor intensidad. En cambio, en Cerrillos, El Bosque y Parque O'Higgins se aprecia una gran variabilidad en la dirección del viento desde los sectores Sureste, Sur y Suroeste; no hay componente desde el norte.

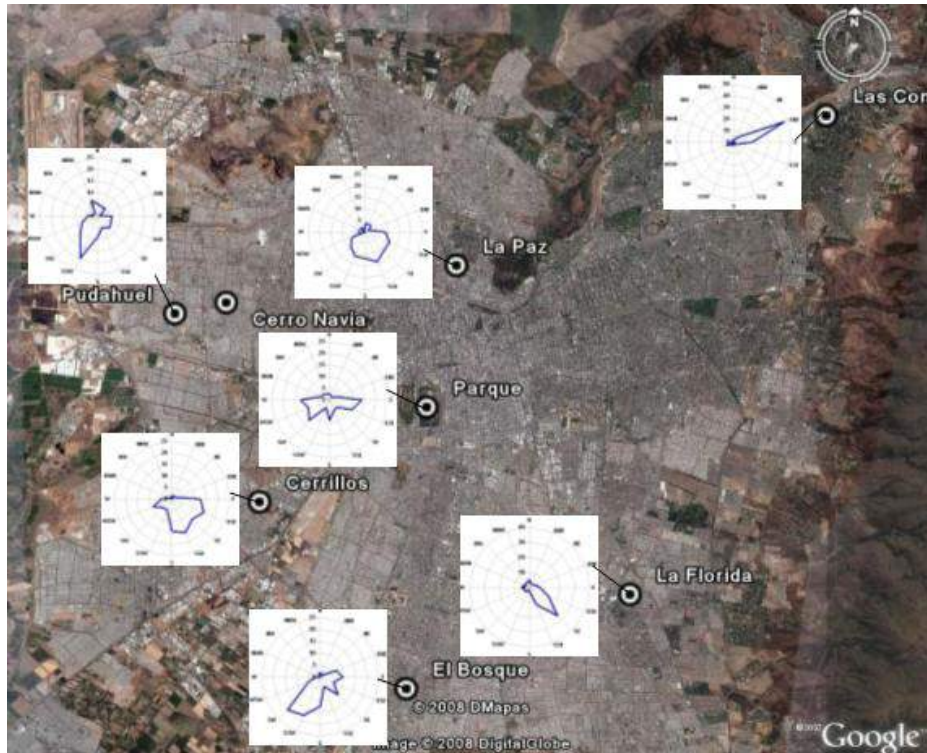


Figura 5-35 Direcciones predominantes del viento para días de episodio Tipo BPF, a las horas de mayor concentración de MP10 (18 a 23h) en estaciones de la red MACAM2

5.5 Comportamiento de MP10 con viento local en Pudahuel

La Figura 5-36 muestra un gráfico de dispersión entre las concentraciones horarias de MP10 y la velocidad de viento registradas en Pudahuel para el período de abril a agosto, entre los años 2004 a 2007. Se aprecia una relación inversamente proporcional, es decir a mayor viento menores concentraciones. Las mayores concentraciones (sobre $400 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) ocurren con velocidades de viento entre $0,5 \text{ m/s}$ y $1,5 \text{ m/s}$. Existen algunas concentraciones mayores con velocidades sobre 3 m/s , que corresponden a horas de la tarde durante el mes de abril de 2005; esto podría ser efecto de polvo resuspendido en el entorno de la estación. Con velocidades de viento sobre 5 m/s las concentraciones de MP10 no superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

Muñoz *et al.* (2003) observaron que las mayores concentraciones de MP10 durante las primeras horas de la noche en la zona de Pudahuel están asociadas a un flujo superficial diurno débil y un rápido descenso de la intensidad de los vientos durante la transición día noche. Mientras que en la estación Pudahuel los flujos nocturnos son típicamente muy cercanos a cero, con gran porcentaje de calmas, en las demás estaciones los flujos nocturnos tienen magnitudes mayores que cero, los que parecen estar ligados a flujos de drenaje de aire frío.

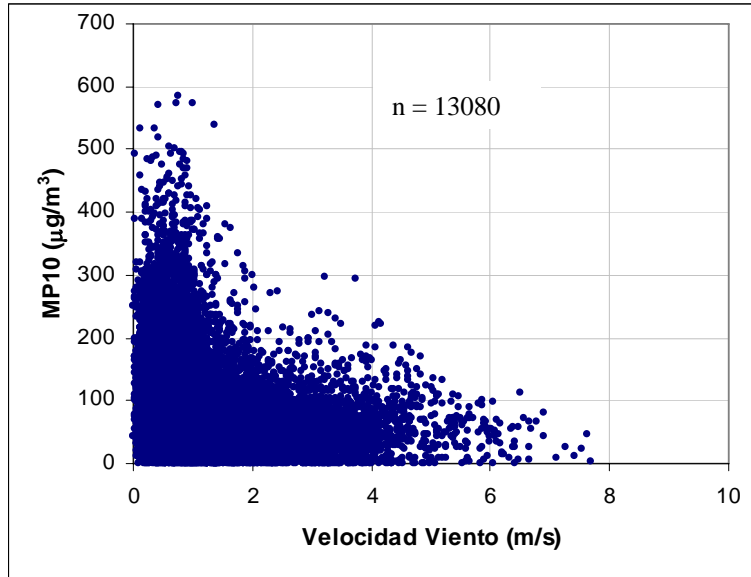


Figura 5-36 Correlación entre concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento en estación Pudahuel, abril-agosto 2004 a 2007

La Figura 5-37 presenta un gráfico de dispersión entre las concentraciones horarias de MP10 y la dirección de viento. Las concentraciones horarias de MP10 más altas no se agrupan en una dirección predominante, pero coinciden con velocidades de viento muy bajas, lo cual explica que la dirección del viento tenga un comportamiento poco definido con una fuerte variabilidad respecto a la hora anterior, a diferencia de las velocidades altas para las cuales se mantiene una dirección predominante por varias horas.

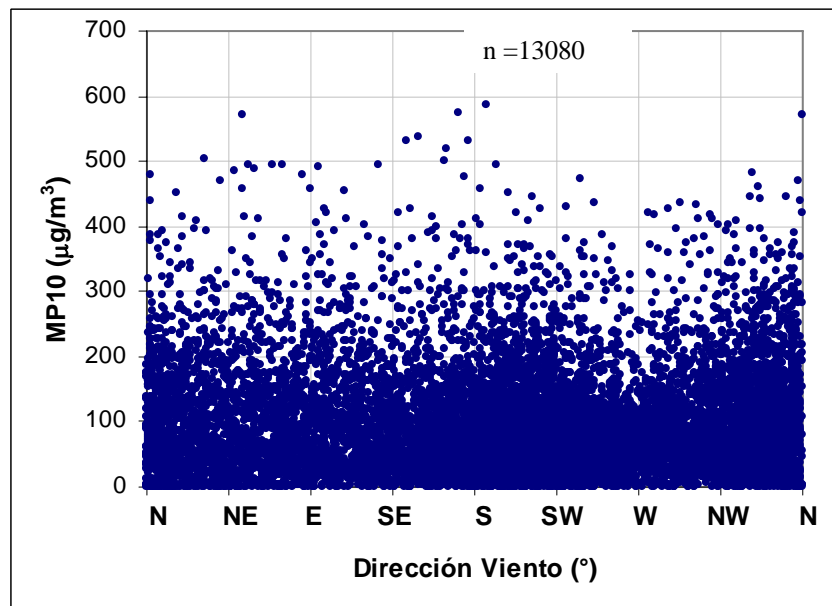


Figura 5-37 Correlación de MP10 con la dirección del viento en Pudahuel

La Figura 5-38 presenta un gráfico de dispersión entre las concentraciones diarias de MP10 y la velocidad de viento promedio diaria para los meses de abril a agosto, entre los años 2004 y 2007. Se aprecia un comportamiento similar al ilustrado para las concentraciones horarias en la Figura 5-36, es decir los días con concentraciones más altas corresponden a días con menores velocidades de viento promedio. La mayoría de los días que superan el valor de la norma diaria de MP10 tienen velocidades de viento promedio menores a 1,5 m/s.

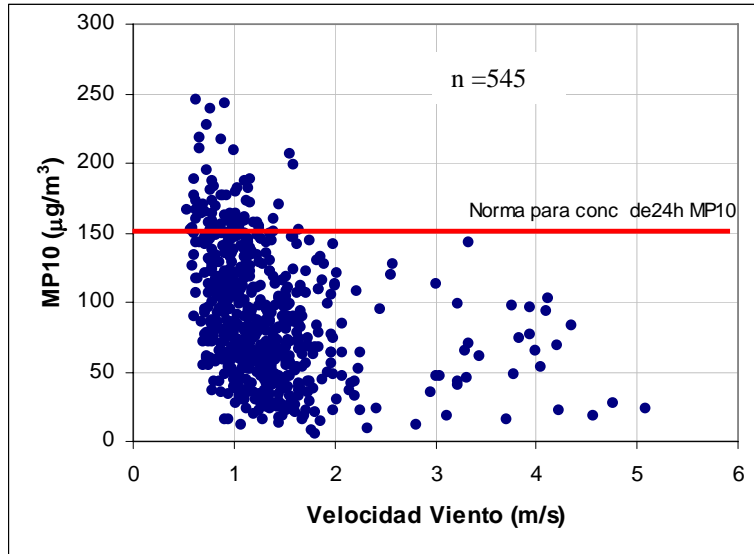


Figura 5-38 Correlación entre las concentraciones de MP10 de promedios diarios y la velocidad de viento en Pudahuel. Abril a agosto de 2004 a 2007

La Figura 5-39 muestra los ciclos diarios de MP10 en función de la velocidad de viento para el período abril-agosto entre los años 2004 a 2007. Se aprecia que durante la noche y hasta las 10h aproximadamente, la velocidad de viento en promedio se mantiene entre 1 y 1,2 m/s. Durante la tarde, a las horas de mayor temperatura, la velocidad de viento alcanza valores máximos cercanos a 2,5 m/s, cuando las concentraciones descienden hasta mínimos cercanos a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Desde las 21h la velocidad de viento es menor a 1,5 m/s y las concentraciones aumentan hasta unos 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ en promedio. El máximo observado a las 08-09h se puede asociar probablemente al inicio de la actividad y emisiones de diverso tipo en la zona.

La Figura 5-40 muestra los ciclos diarios de las concentraciones de MP10 y la velocidad de viento para días con concentraciones sobre el valor de la norma diaria (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) durante el período abril-agosto de los años 2004 y 2007. Se aprecia un máximo de velocidad de viento cercano a 1,8 m/s, valor menor respecto al máximo y mayor respecto al promedio del período de invierno ilustrado en la Figura 5-39, coincidiendo con las mínimas concentraciones cercanas

a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ entre 14 y 16h. Desde las 19h las velocidades de viento son menores a 1 m/s coincidiendo con el fuerte aumento de las concentraciones de MP10 que alcanzan valores cercanos a $260 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ alrededor de las 23h. El rápido crecimiento de las concentraciones de MP10 que triplica las concentraciones en un par de horas, luego de alcanzar valores mínimos alrededor de las 17h, coincidiendo además con disminución de la velocidad de viento hasta valores menores a 1 m/s, permite suponer que las concentraciones deben asociarse además, al impacto de fuentes emisoras locales por sobre el impacto de fuentes lejanas que requieren de viento para transportarse.

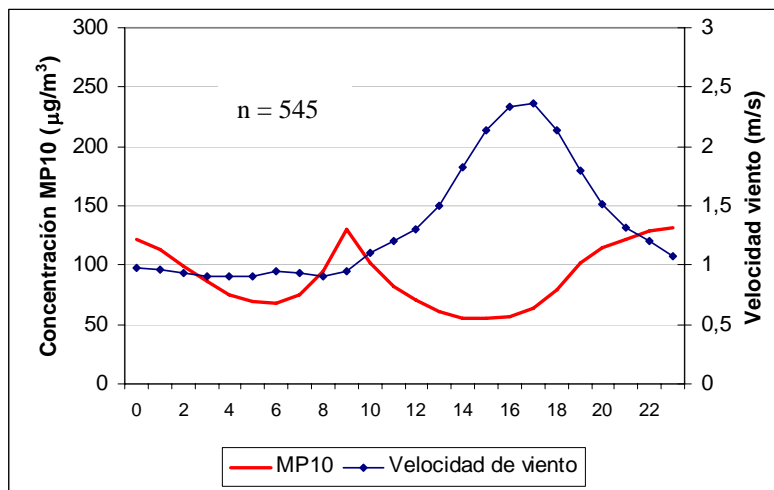


Figura 5-39 Ciclo diario de concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento para el período abril-agosto de 2004 y 2007 en la estación Pudahuel

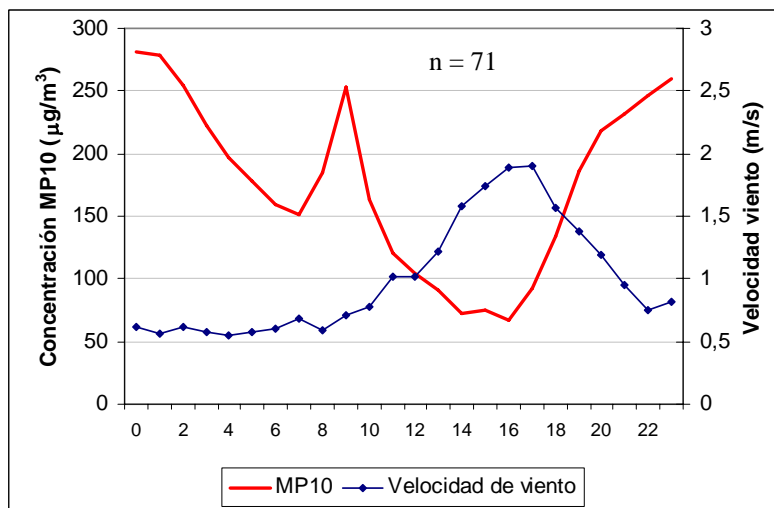


Figura 5-40 Ciclo diario de concentraciones horarias de MP10 y velocidad del viento, en días con concentraciones de MP10 sobre la norma. Período Abril-Agosto de 2004 y 2007 en estación Pudahuel

Para Pudahuel, la Figura 5-41 muestra una comparación para 35 días de episodio tipo A, 19 días de episodios tipo BPF y 491 días bajo norma entre (a) el ciclo diario de MP10 y b) el ciclo diario de velocidad del viento. Se aprecia claramente que los días con concentraciones bajo la norma tienen un ciclo diario con mayores velocidades de viento durante todo el día. Se observa una relación inversa entre las concentraciones en días de episodio tipo A o tipo BPF y velocidad de viento; es decir, a menores velocidades de viento se producen mayores concentraciones como es el caso de las noches de episodios tipo A y para mayores velocidades del viento se registran menores concentraciones, como es el caso de las tardes de los días de episodios tipo A que coinciden con tardes soleadas de mayor temperatura.

El ciclo diario de velocidad del viento para días de episodio tipo A presenta un máximo cercano a 1,8 m/s alrededor de las 17h; este valor es mayor al máximo cercano a 1,4 m/s para días de episodio tipo BPF. Desde las 18h, durante días de episodio tipo A se presenta un descenso mayor en la intensidad del viento coincidiendo con un mayor aumento de las concentraciones de MP10 respecto a días de episodio tipo BPF. Durante la madrugada la intensidad del viento para los días de episodios tipo A y tipo BPF se mantiene cercana a 0,6 m/s.

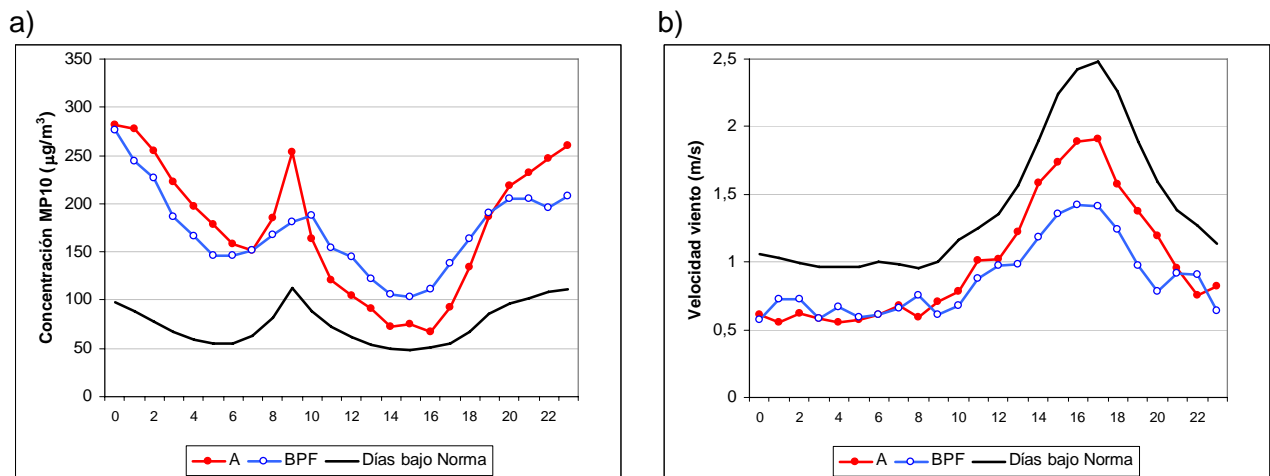


Figura 5-41 Ciclo diario a) concentraciones horarias promedio de MP10 para días de episodio tipo A, tipo BPF y días bajo norma y b) velocidad del viento. Período abril- agosto de 2004 a 2007 en la estación Pudahuel.

Los días de episodio tipo A en Pudahuel tienen un brusco aumento de concentraciones alrededor de las 08h, asociado al inicio de la actividad en la ciudad y al tráfico vehicular; durante la tarde, a las horas de mayor ventilación, se producen las concentraciones mínimas, las cuales son menores a las mínimas registradas durante días de episodio tipo BPF.

La Figura 5-42 muestra la comparación entre el ciclo diario de concentraciones horarias promedio de MP10 en Las Condes (a) y el ciclo diario de velocidad de viento en Las Condes (b), para 35 días de episodio tipo A y 19 días tipo BPF en los cuales se supera el valor de la norma en Pudahuel y para días bajo norma en Pudahuel (491 días entre abril y agosto de años 2004 a 2007).

Se aprecia un ciclo de velocidad de viento distinto al registrado en Pudahuel; durante la noche y madrugada en episodios tipo A la velocidad del viento presenta los mayores valores (entre 2 y 2,5 m/s). Entre las 10h y 18h se producen fuertes descensos en la intensidad del viento, los cuales coinciden con el cambio de régimen en la dirección del viento, de ENE a WSW a las 10h con un mínimo de 1 m/s y de WSW a ENE a las 18h, período en el cual se registra un mínimo de aproximadamente 0,7 m/s. Los episodios tipo BPF, tienen un comportamiento similar al de tipo A, pero con menor intensidad del viento, especialmente a las horas de mayor concentración en Pudahuel (entre 18 y 23h). El ciclo diario de velocidad de viento para días de episodio tipo A presenta un máximo cercano a 1,8 m/s alrededor de las 17h; valor mayor al máximo para días de episodio tipo BPF, cercano a 1,4 m/s.

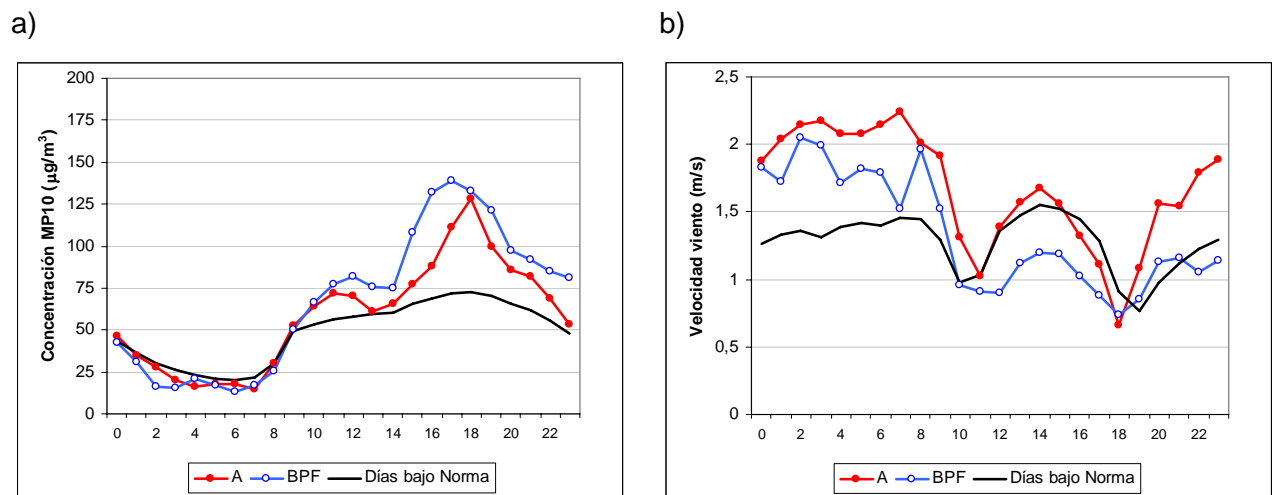


Figura 5-42 Ciclo diario a) concentraciones horarias promedio de MP10 en estación Las Condes y b) velocidad de viento en estación Las Condes, para días con concentraciones de MP10 mayores al valor de la norma en la estación Pudahuel durante episodios tipo A y BPF de 2004 a 2007 (incluye una serie con el promedio de días bajo norma)

El ciclo diario de las concentraciones de MP10 en Las Condes presenta, para días de episodio, concentraciones bastante menores a las de Pudahuel, incluso hay ocasiones en los cuales la calidad del aire por MP10 es buena en Las Condes (bajo la norma) en tanto que en Pudahuel se alcanzan valores de alerta o pre-emergencia. Durante la madrugada, en Las Condes, se presentan los menores valores, incluso bajo $25 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$; alrededor de las 07h

comienza un aumento de concentraciones alcanzando un máximo secundario del orden de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ entre las 10h y 11h; durante el período de cambio de dirección de viento las concentraciones y la velocidad de viento disminuyen. Desde las 14h se produce un nuevo aumento de concentraciones hasta un valor máximo promedio cercano a $145 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ alrededor de las 18h. El ciclo de las concentraciones de MP10 es similar para días de episodios tipo A y tipo BPF, pero en estos últimos se alcanzan mayores concentraciones y menores velocidades de viento.

5.6 Fuentes emisoras de MP10

Para la comuna de Pudahuel solamente fue posible recopilar información de las emisiones de fuentes industriales (subconjunto de fuentes estacionarias) y móviles utilizadas en la actualización del inventario de la Región Metropolitana que está desarrollando CENMA por encargo de CONAMA. Se identificó un total de 147 fuentes estacionarias para Pudahuel, correspondientes principalmente a grupos electrógenos de respaldo, hornos panificadores y calderas de calefacción e industriales. Las principales fuentes estacionarias cercanas a la estación Pudahuel, corresponden a panaderías (hornos panificadores), terminales de buses y las calderas industriales de Cecinas Super (0,7 t/año), Breden (0,4 t/año).

De acuerdo al inventario oficial (DICTUC, 2006) en la Región Metropolitana las emisiones de MP10 de fuentes industriales y móviles alcanzan a 3017,2 t/año. Luego, la estimación de emisiones para Pudahuel corresponde a un 1,5% del total de emisiones de MP10 desde fuentes industriales y móviles en la Región Metropolitana, donde autos e industrias representan menos del 0,5% y camiones pesados un 3,5%.

El Cuadro 5-10 presenta una comparación entre el total de emisiones anuales de fuentes móviles e industriales estimadas para la comuna de Pudahuel y la Región Metropolitana.

Cuadro 5-10 Comparación de emisiones de MP10 desde fuentes móviles e industrias para Pudahuel y Región Metropolitana

| | Autos t/año | Camiones pesados t/año | Buses licitados t/año | Otros Buses t/año | Industrias t/año | Total móviles e industrias t/año |
|------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--|
| Pudahuel | 2,0 | 26,8 | 2,2 | 3,1 | 6,6 | 45,1 |
| RM | 514,0 | 763,0 | 221,0 | 94,0 | 1266,9 | 3017,2 |
| % Pudahuel | 0,4 | 3,5 | 1,0 | 3,3 | 0,5 | 1,5 |

Fuente: elaborado desde CENMA, 2008b y CONAMA, 2009

Las principales fuentes fijas, incluyendo los terminales de buses, se ubicaron en una mapa de la zona de Pudahuel (Figura 5-43). Se incluyó la fuente fija Fanaloza (6,9 t/año), ubicada en la comuna de Cerro Navia, a unos 4 km al noreste de la estación Pudahuel, por su alta emisión anual de MP10 (6,9 t/año), equivalente al total de emisiones de MP10 desde fuentes industriales en la comuna de Pudahuel.

El Cuadro 5-11 presenta la estimación de emisiones anuales y horarias para las principales categorías de fuentes industriales de la comuna de Pudahuel.



Figura 5-43 Ubicación de las principales fuentes emisoras en la zona de Pudahuel (emisiones en kg/año)

Cuadro 5-11 Emisiones de MP10 desde categorías de fuentes industriales de la comuna de Pudahuel

| Categoría de fuente | Número fuentes | Emisión | |
|-----------------------|----------------|-------------|-----------------|
| | | Anual t/año | Horaria kg/hora |
| Grupos electrógenos | 36 | 1,0 | 6,2 |
| Calderas industriales | 22 | 2,9 | 0,5 |
| Calderas calefacción | 30 | 1,1 | 0,3 |
| Hornos panificadores | 39 | 0,4 | 0,4 |
| Otros hornos | 6 | 0,5 | 0,2 |
| Otros | 14 | 0,7 | 0,3 |
| TOTAL | 147 | 6.6 | 7.9 |

Fuente: elaborado a partir de CENMA, 2008b y CONAMA, 2009

Al considerar la emisión anual, algunas fuentes pueden tener un impacto subestimado durante el análisis de los episodios de altas concentraciones de MP10, para estos casos se debería considerarse la emisión horaria, especialmente desde las 18h hasta las primeras horas del día siguiente, horas durante las cuales aumentan las concentraciones de MP10. Por ejemplo, los grupos electrógenos de respaldo de industrias que funcionan algunas horas, generalmente en las noches, durante los días de invierno para evitar superar los límites de consumo eléctrico y pagar multas establecidas por las compañías distribuidoras de electricidad.

La Figura 5-44 muestra una comparación entre el porcentaje de emisión de fuentes horarios y anuales. Se aprecia, que el equivalente horario para grupos electrógenos corresponde al 79% de las emisiones, en cambio las otras categorías tienen porcentajes menores a 6% cada una. Las calderas industriales corresponden al 44% de la emisión anual de las fuentes industriales, pero al considerar la emisión horaria solamente alcanza un 6% del total.

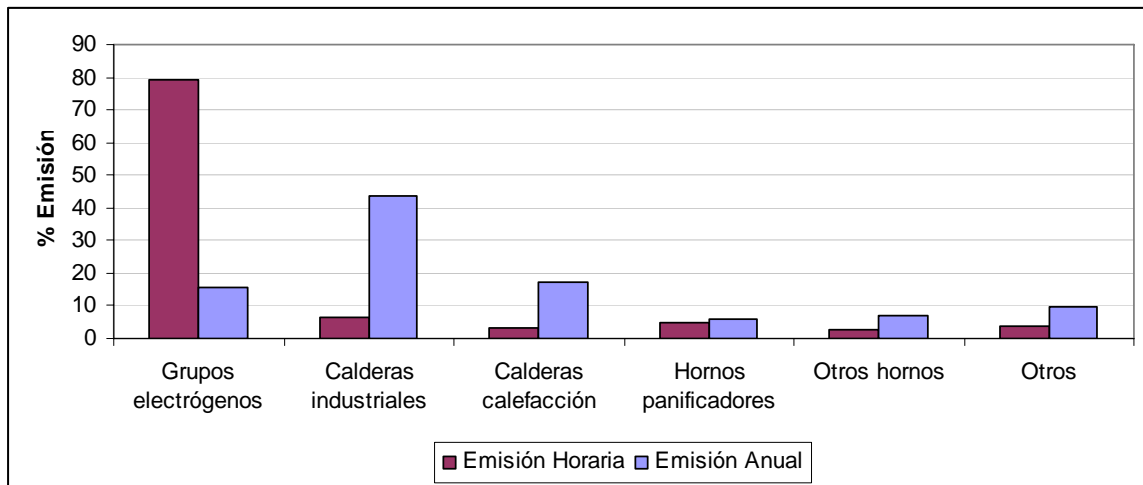
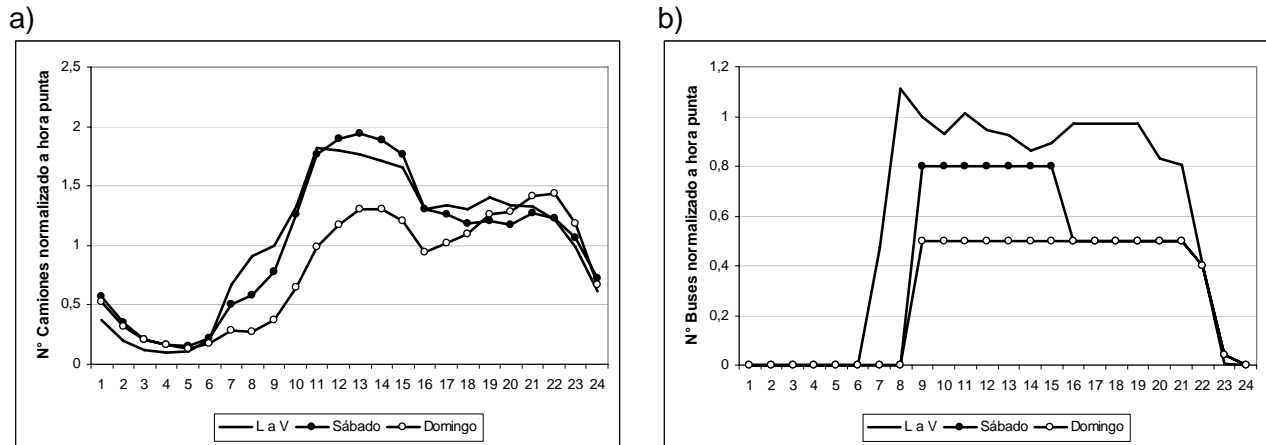


Figura 5-44 Comparación porcentual de emisiones horarias y anuales desde fuentes industriales en la comuna de Pudahuel

La Figura 5-45 a) y b) ilustra el comportamiento diario, en función del flujo o cantidad de vehículos en circulación, de las categorías de fuentes móviles con mayores niveles de emisión, esto es camiones pesados y buses licitados (DIMEC, 2007a; DIMEC, 2007b). El flujo se estimó para el sector 5 que agrupa a las comunas Renca, Cerro Navia, Lo Prado, Pudahuel y Quinta Normal. El flujo se presenta normalizado respecto al flujo de hora punta (09h), para días de semana (lunes a viernes) y días sábado y domingo. El flujo de camiones pesados tiene un comportamiento similar todos los días, con un máximo entre 10h y 13h. Durante la tarde el flujo disminuye un 30% respecto a la mañana. Para un día domingo, el flujo de camiones durante la

mañana disminuye un 30% respecto a los máximos de la semana, pero presenta los valores más altos durante la noche, entre 21h y 22h.



Fuente: Elaborado a partir de DIMEC, 2007a y DIMEC, 2007b

Figura 5-45 Ciclo diario flujo normalizado a hora punta en sector 5 para: a) camiones pesados y b) buses licitados

Para buses licitados, hay diferencia en el flujo de días de semana, día sábado y día domingo. Durante la semana, se aprecia un aumento previo a la hora punta, el cual puede estar asociado a la salida de buses desde la gran cantidad de terminales de buses en la zona. Entre las 10h y 22h el flujo se mantiene entre 90% y 100%, respecto de la hora punta. Desde las 23h hasta las 06h circula una cantidad de vehículos cercana a 0. Los días sábado circula un 80% durante la mañana y un 50% durante la tarde respecto al día de semana, en cambio para un día domingo el flujo es un 50% respecto a los días de semana.

La revisión del ciclo semanal de las fuentes móviles y la consideración de que las fuentes industriales generalmente tienen menor actividad durante los fines de semana, permite estimar menores emisiones para los fines de semana, lo cual no explicaría el aumento de concentraciones de MP10 durante las noches de fin de semana presentado en la Figura 5-18. Por lo tanto, es probable que este aumento de concentraciones esté asociado a fuentes locales que no fue posible evaluar, entre ellas el consumo de leña para calefacción domiciliar y la resuspensión de polvo producto de la circulación de vehículos desde calles y caminos, considerando que en fines de semana aumentaría el flujo de vehículos particulares.

Por lo tanto, en la zona de Pudahuel los camiones pesados que utilizan diesel como combustible, buses (licitados y particulares) y los grupos electrógenos de respaldo que funcionan durante las horas de mayor contaminación corresponden a las principales fuentes

emisoras de MP10 evaluadas, sin considerar el MP10 asociado a la resuspensión de polvo por la circulación en calles y la quema de leña lo cual no fue evaluado.

5.7 Aporte de fuentes emisoras de MP a los niveles de concentración de MP10 de Pudahuel

Los primeros estudios para determinar la composición físico-química del material particulado de Santiago fueron realizados en los años 80 por investigadores de las Universidades de Chile y de Santiago (Préndez *et al.*, 1984; Préndez, 1993b; Trier, 1984; Trier y Silva, 1987; Rojas *et al.*, 1990).

Silo y Lissi (1982) correlacionaron concentraciones de azufre con visibilidad en Santiago, Préndez (1984) determinó concentraciones elementales en muestras tomadas con Hi-vol (muestreador de alto volumen), Trier (1984) utilizó un dicótomo para medir concentraciones de MP10, fracciones finas y gruesas. Trier y Silva (1984) presentaron tendencias estacionales de contaminación del aire y usaron análisis de componentes principales para identificar fuentes contaminantes en Santiago. Rojas (1990) aplicó técnica de análisis de factores principales a concentraciones de material particulado, medidas al interior de la Universidad de Santiago para identificar fuentes contaminantes. Ortiz *et al.* (1993) analizaron el efecto de la capa de inversión térmica sobre aerosoles atmosféricos fraccionados menores de 2,84 μm .

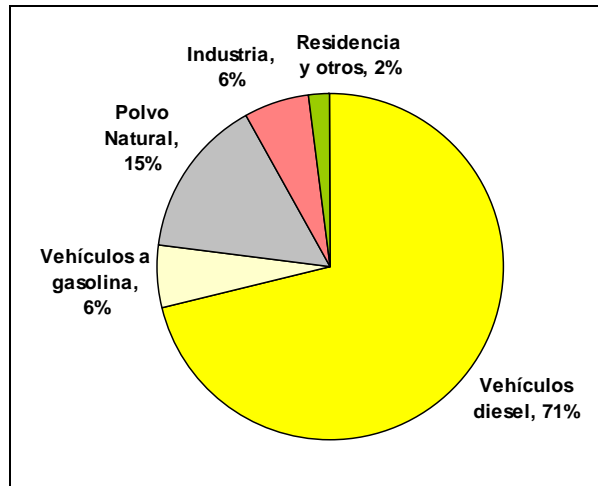
La mayoría de los estudios mencionados corresponden a mediciones puntuales o de corta duración (pocos valores); esto, sumado a los cambios en los combustibles y mejoramiento de las medidas de control de emisiones en las fuentes emisoras de partículas limita la interpretación y utilización de esos resultados.

La Universidad de Chile (1985) determinó que los vehículos diesel aportan un 71% a las concentraciones ambientales de MP10, a pesar de sólo representar un 19% del total de emisiones de MP10. En cambio, el polvo natural, la principal fuente emisora de MP10 con un 49% de las toneladas emitidas, sólo aporta un 15% a las concentraciones de MP10. Los resultados del estudio se resumen en un gráfico de tortas en la Figura 5-46.

Durante los últimos años, los estudios se han enfocado hacia el material particulado secundario o la toxicidad de éste, es decir enfocados en fuentes específicas (emisiones vehiculares, combustión de calderas, combustión de leña, otros) lo cual no permite un estudio en forma integral.

Entre 1996 y 1999, CONAMA RM realizó campañas de caracterización físico-química durante el período de otoño-invierno (Artaxo, 1996; Artaxo, 1998; Artaxo, 1999, Artaxo *et al.*, 1999), siendo estos estudios la información más completa y actualizada que se encuentra

disponible para Santiago, los cuales incorporan identificación de las fuentes emisoras con mayor participación en las concentraciones observadas. La estimación del aporte de fuentes contaminantes se realiza mediante el análisis de componentes principales a las muestras obtenidas en diferentes puntos de Santiago. En el año 2005, la Universidad de Santiago, por encargo de CONAMA realizó una campaña similar para actualizar los resultados y apoyar la actualización del PPDA de la Región Metropolitana (Gramsch, 2006).



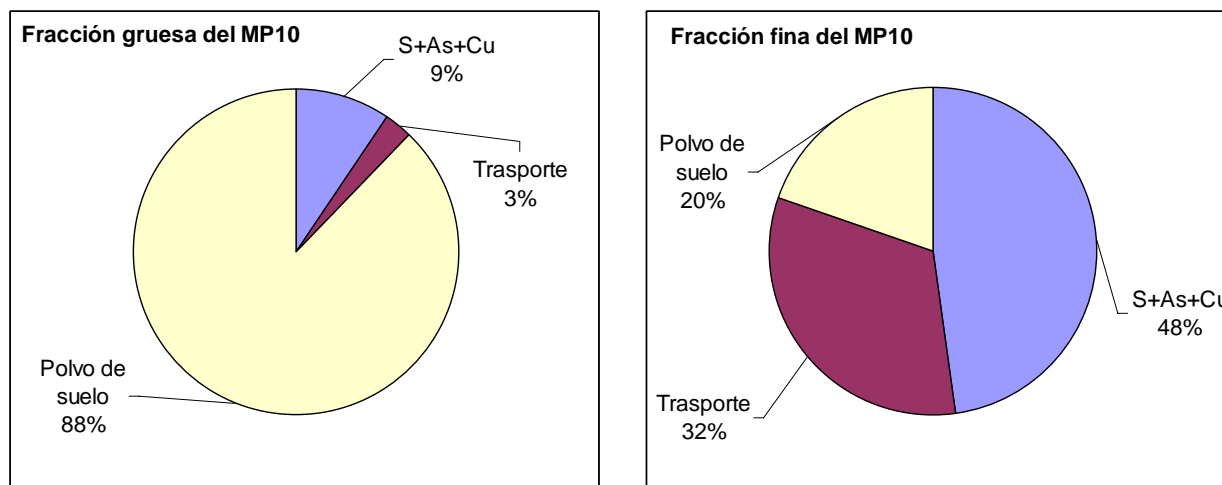
Fuente: (U. de Chile, 1985)

Figura 5-46 Aporte de principales fuentes en los niveles de MP10

El modelo de balance de elementos químicos (conocido como CMB por sus siglas en Inglés) aplicado por primera vez por Hidy and Friedlander en 1971 es considerado el modelo receptor fundamental. Para Santiago, este modelo ha sido aplicado por De la Vega *et al* (1987) y en tesis de pregrado, entre ellas Mancilla (1998) y Alvarado (2008). La principal limitación del modelo, lo cual resta validez a dichos resultados, es la necesidad de contar con información de los elementos químicos presentes en las fuentes emisoras (perfiles), lo cual no está disponible para Santiago, excepto para algunas fuentes estacionarias (Préndez *et al.*, 2007), siendo necesario recurrir a perfiles de fuentes similares disponibles en bases de datos de US EPA las cuales pueden tener diferencias en el perfil de los elementos afectando con ello los resultados.

Artaxo (1999) aplicó el modelo de análisis de componentes principales absolutos (ACPA) a muestras de fracciones fina y gruesa de MP10 recolectadas con equipos gravimétricos durante el invierno de 1998 en Talagante, Peldehue, Pudahuel, Parque O'Higgins y Las Condes. En Pudahuel las muestras fueron recolectadas en la estación de monitoreo de la red MACAM2 obteniendo para fracciones fina y gruesa solamente 3 factores: polvo de suelo, transporte (emisiones vehiculares) y "S+As+Cu", este último lo asoció a fundiciones de cobre.

En la fracción gruesa, en promedio, un 88% (correspondiente a $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se atribuyó a polvo de suelo, un 9% a fuentes emisoras de S+As+Cu y un 3% a transporte. Para la fracción fina, la principal fuente está asociada a la emisión de S+As+Cu con un 48% (correspondiente a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido de transporte con un 32% y polvo de suelo con 20%. El aporte de las fuentes expresado en porcentajes se ilustra en los gráficos de tortas de la Figura 5-47.

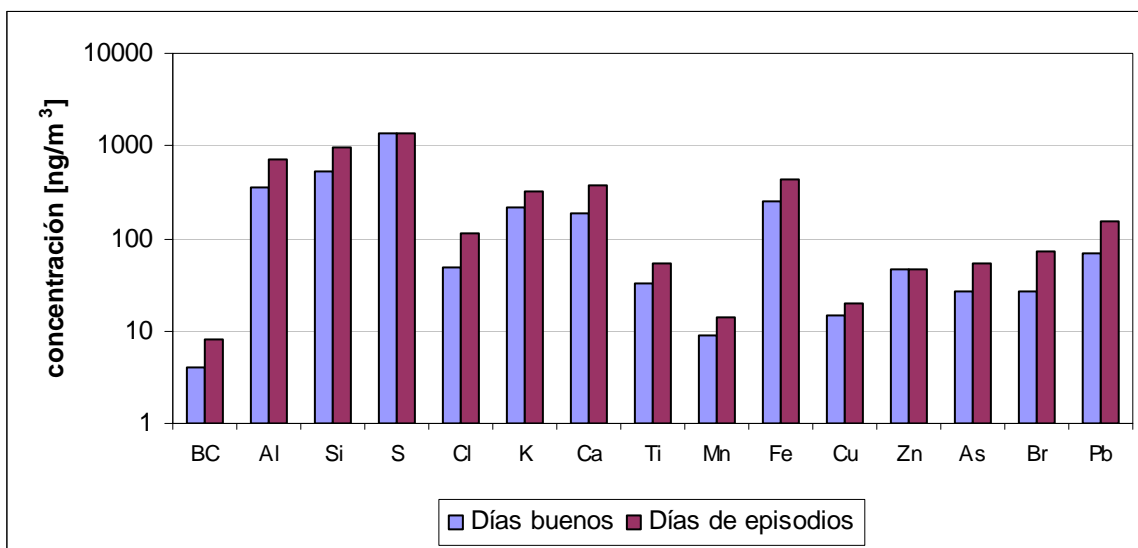


Fuente: (Artaxo, 1999)

Figura 5-47 Porcentaje promedio de aporte de fuentes de material particulado en fracciones fina y gruesa de concentraciones de MP10. Campaña realizada en el invierno de 1998 en la estación Pudahuel de la red MACAM2

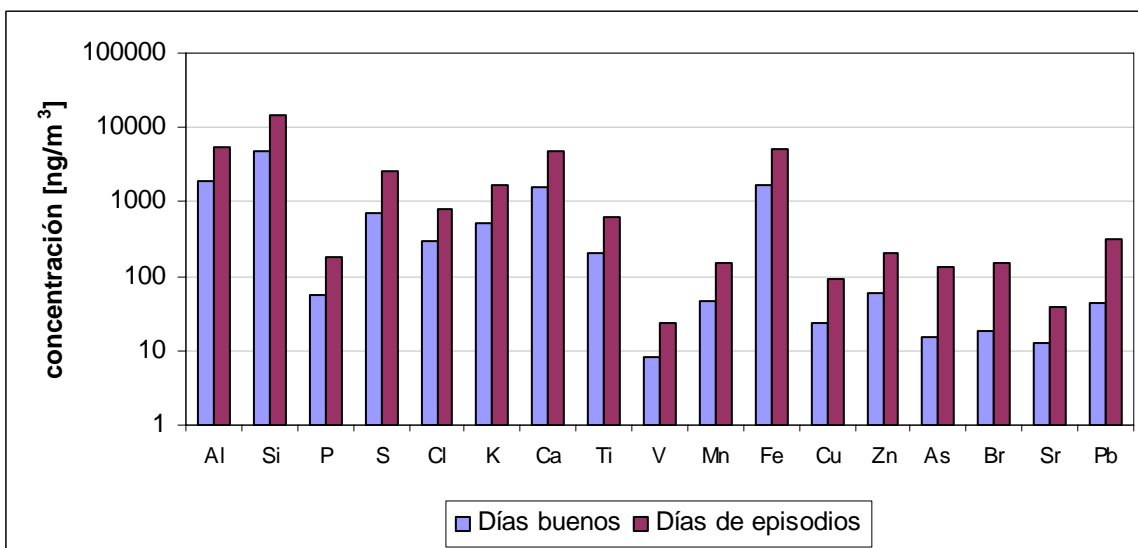
El resultado obtenido por Artaxo (1999) corresponde a un valor promedio para el período invernal del año 1998; no analiza si existen diferencias en la participación de las fuentes emisoras de MP10 durante los días de mayores concentraciones en comparación a días de bajas concentraciones. Por este motivo, en esta tesis se aplicó nuevamente el método de análisis de componentes principales absolutos (ACPA) para los resultados de análisis químicos de la estación Pudahuel, fracciones fina y gruesa. Se mantuvieron 3 factores, pero se hizo una separación entre días de episodio (alertas y pre-emergencias, es decir concentraciones de MP10 mayores a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y días buenos (concentraciones menores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las Figuras 5-48 y 5-49 presentan una comparación de las concentraciones de los elementos químicos entre días buenos (concentración diaria de MP10 menor a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y los días de episodios (concentraciones diarias de MP10 mayores a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para la fracción fina y gruesa de MP10 obtenidas en las campañas de invierno de 1998 por Artaxo (1999). Se aprecia para días de episodio un aumento de las concentraciones para todos los elementos respecto a los días buenos.



Fuente: (Artaxo, 1999)

Figura 5-48 Comparación de concentraciones de elementos químicos entre días buenos y días de episodio para fracción fina en estación Pudahuel, Invierno 1998

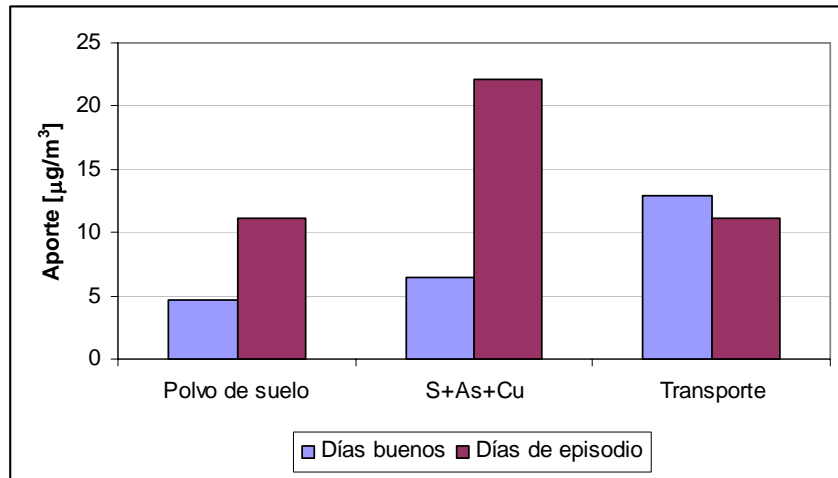


Fuente: (Artaxo, 1999)

Figura 5-49 Comparación de concentraciones de elementos químicos entre días buenos y días episodios para fracción gruesa en estación Pudahuel, Invierno 1998

La Figura 5-50 muestra la comparación del aporte de las fuentes de MP10 estimado para días buenos y días de episodio para la fracción fina en Pudahuel. Se aprecia para días de episodio un aumento de la fuente "S+As+Cu" de 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido por el aumento de polvo de suelo de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en cambio, el aporte del transporte disminuye de 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La disminución del aporte del transporte podría explicarse por el aumento de

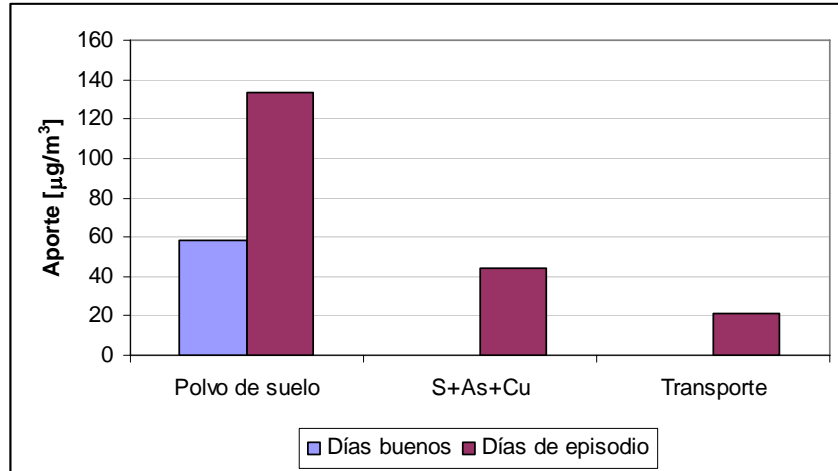
la restricción a la circulación a vehículos sin convertidor catalítico de 2 a 4 dígitos en alerta y a 6 dígitos en pre-emergencia.



Fuente: (Artaxo, 1999)

Figura 5-50 Aporte promedio de principales fuentes en fracción fina de concentraciones de MP10 en estación Pudahuel para días buenos y días de episodio, Invierno 1998

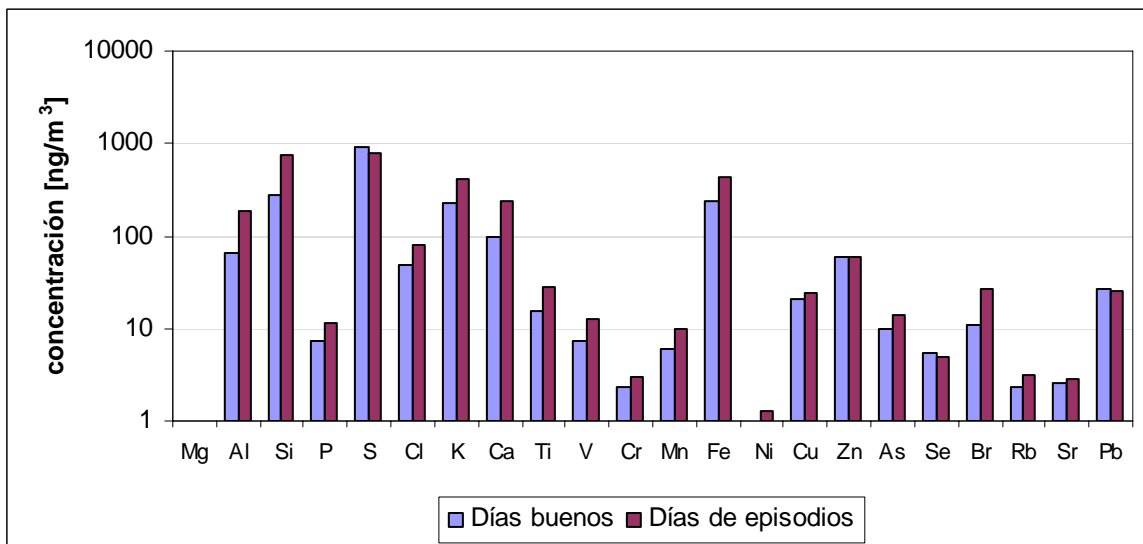
La Figura 5-51 muestra la comparación del aporte de las fuentes de MP10 entre días buenos y días de episodio para la fracción gruesa en Pudahuel. De acuerdo a ACPA y a los factores elegidos, para días buenos se aprecia solamente el aporte de polvo de suelo, con un valor cercano a 60 µg/m³, el cual aumenta más del doble durante días de episodio alcanzando 135 µg/m³, seguido de “S+As+Cu” con un aporte de 44 µg/m³ y transporte con 20 µg/m³. Considerando el valor promedio de la suma de los 3 factores para las fracciones fina y gruesa de MP10, para días de episodio hay un aumento cercano a 161 µg/m³ respecto a los días buenos, correspondiendo a polvo de calles el mayor aumento (81 µg/m³), seguido de “S+As+Cu” (61 µg/m³) y transporte (19 µg/m³). De acuerdo a estos resultados, a pesar de medidas de disminución de emisiones en industrias y sector transporte durante días de episodios se produce un aumento de las concentraciones de MP10 asociadas a los 3 factores, especialmente para la fracción gruesa.



Fuente: (Artaxo, 1999)

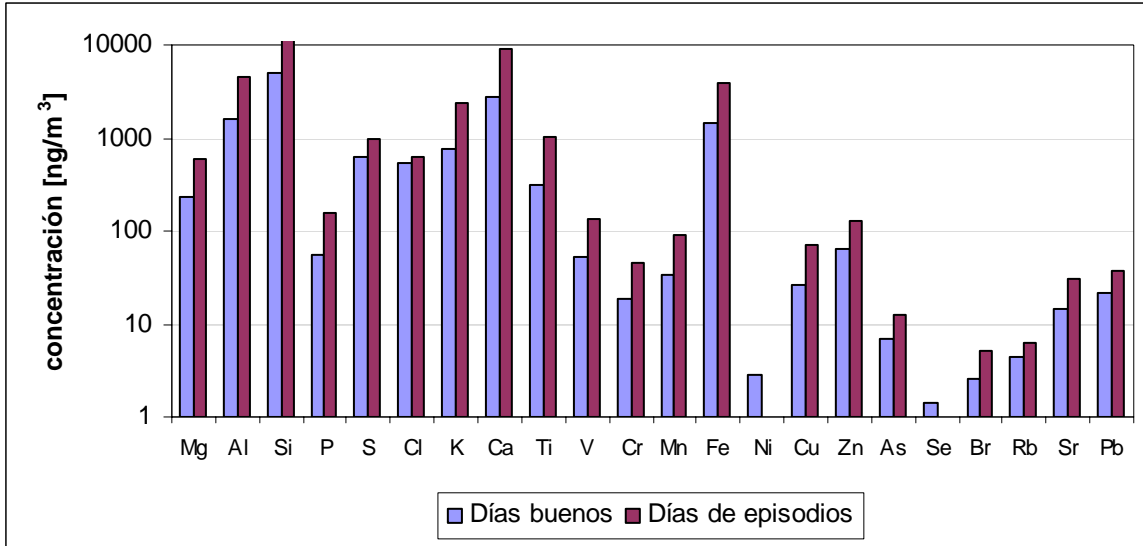
Figura 5-51 Aporte promedio de principales fuentes en fracción gruesa de concentraciones de MP10 en estación Pudahuel para días buenos y días de episodio, Invierno 1998

Las Figuras 5-52 y 5-53 presentan una comparación de las concentraciones de los elementos químicos entre días buenos (concentración diaria de MP10 menor a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y los días de episodios (concentraciones diarias de MP10 mayores a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para la fracción fina y gruesa de MP10 obtenidas por Gramsch (2006a). Se aprecia para días de episodio resultados similares a los obtenidos por Artaxo (1999), es decir un aumento de las concentraciones para todos los elementos respecto a los días buenos, pero con menores concentraciones tanto en días de episodio como en días buenos.



Fuente: (Gramsch, 2006a)

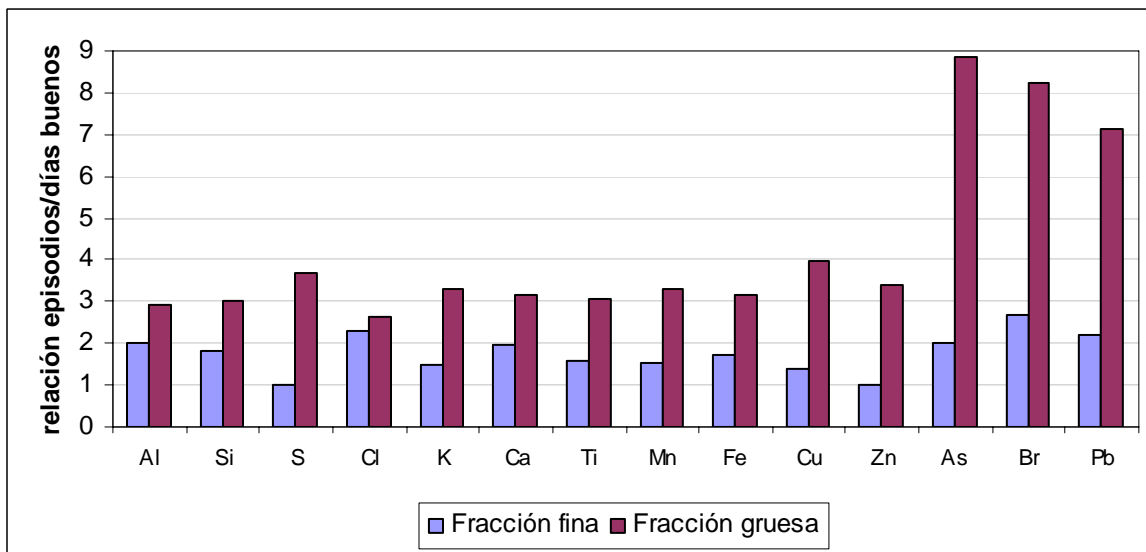
Figura 5-52 Comparación de concentraciones de elementos entre días sobre el nivel de la norma y días bajo $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fracción fina en estación Pudahuel, Campaña 2005



Fuente: (Gramsch, 2006a)

Figura 5-53 Comparación de concentraciones de elementos entre días sobre el nivel de la norma y días bajo $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fracción gruesa en estación Pudahuel, Campaña 2005

Las Figuras 5-54 y 5-55 presentan una comparación de la relación de las concentraciones en días de episodio y días buenos para las fracciones fina y gruesa de MP10 obtenidas por Artaxo (1999) y Gramsch (2006a).



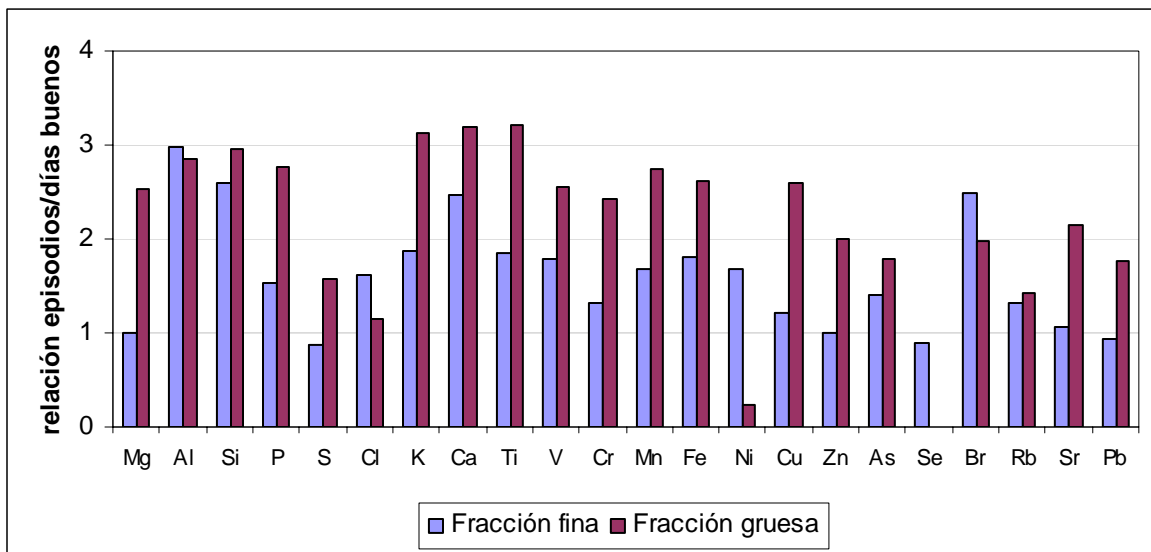
Fuente: (Artaxo, 1999)

Figura 5-54 Relación concentración de MP10 entre días de episodios y días buenos para fracciones fina y gruesa en estación Pudahuel, campaña 1998

La Figura 5-54 muestra que para el invierno de 1998 los mayores aumentos de concentración de elementos químicos se obtienen en la fracción gruesa para días de episodio respecto a días buenos, alcanzando los máximos para As, Br y Pb. Arsénico aumenta cerca de

9 veces en la fracción gruesa durante días de episodio en comparación a un día bueno. Bromo aumenta 8 veces y plomo 7 veces. El resto de los elementos, excepto cloro, aumenta entre 3 y 4 veces, es decir todos los elementos presentan un aumento durante días de episodio en comparación a días buenos. Para la fracción fina los valores (aumentos en días de episodio) fluctúan entre 1 y 3, con valores cercanos a 3 para As, Br y Pb. En cambio, S, Cu y Zn tienen valores cercanos a 1, es decir no presentan variación entre días buenos y los de episodio en la fracción fina.

En cambio, para la campaña del invierno de 2005, la Figura 5-55 muestra aumentos más moderados para As, Br y Pb del orden de 2 veces en la fracción gruesa durante días de episodio, aunque se mantiene para la mayoría de los elementos un mayor aumento en la fracción gruesa, con valores máximos para Ca, Ti, K, Si cercanos a 3 veces. Para la fracción fina el mayor aumento es para calcio cercano a 3 veces.



Fuente: (Gramsch, 2006a)

Figura 5-55 Relación concentración de MP10 entre días de episodios y días buenos para fracciones fina y gruesa en estación Pudahuel, campaña 2005

Los resultados de la campaña de 2005 en Pudahuel permitieron identificar la composición química para MP10 y MP2,5, expresados en porcentaje de masa del material particulado (background, natural y antrópico), carbón orgánico, carbono elemental, nitrato, sulfato, amonio y cloro. Para MP10, un 50% corresponde a material particulado, un 18% a carbón orgánico y un 7% a nitrato. Para MP2,5 un 39% corresponde a carbón orgánico, 17% a nitrato, 11% a carbón elemental y sólo un 3% a polvo natural.

5.8 Análisis crítico de las medidas de control y reducción de emisiones de MP10 contenidas en el PPDA de la Región Metropolitana y medidas de gestión de calidad de aire para la comuna de Pudahuel

La primera versión del PPDA de la Región Metropolitana (CONAMA, 1997) consideró 139 medidas distribuidas como:

- 104 medidas de reducción directa y permanente de emisiones, orientadas al control de las actividades o fuentes que originan la contaminación, esto es: transporte, industria, comercio, construcción, agricultura y polvo resuspendido.
- 26 medidas de gestión de episodios críticos de contaminación, esto es, aquellas que se implementan en situaciones de alerta, preemergencia o emergencia.
- 9 medidas de reducción indirecta de emisiones, a saber, instrumentos de sensibilización, participación y educación.

El Plan consideró una revisión y actualización al menos en dos ocasiones para cumplir con las normas de calidad atmosféricas primarias vigentes en Chile para el año 2010.

En este contexto, en enero del año 2004 entró en vigencia la primera actualización del PPDA conteniendo medidas estructurales con un fuerte impacto en la reducción de las emisiones a la atmósfera de material particulado y gases. Las medidas más importantes están relacionadas con la implementación del plan de modernización de transporte público, el expendio de combustibles más limpios y el cumplimiento de metas de reducción de emisiones para el sector industrial. A contar del 1º de septiembre del 2006 se inició el proceso de la segunda actualización del PPDA, separando el capítulo XIV (Plan operacional de gestión de episodios críticos) para implementar desde el año 2007 nuevas medidas de control de emisiones durante los meses de altas concentraciones de MP10 (CONAMA, 2009).

En julio de 2008 se entregó el anteproyecto de revisión, reformulación y actualización del PPDA, el cual contiene medidas estructurales para reducción de emisiones del sector industrial, asociadas al transporte y al polvo resuspendido, entre otras. Contiene además, medidas complementarias para hacer operativo el plan.

Las medidas del PPDA son generales y aplicables en toda la Región Metropolitana; no considera una priorización o medidas específicas para determinadas comunas, en especial para Pudahuel.

5.8.1 Medidas estructurales del PPDA para control y reducción de emisiones

La actualización del PPDA (CONAMA, 2008) considera que el material particulado secundario tiene una participación cercana al 50% de la fracción fina del MP10 de acuerdo a los resultados del estudio de caracterización fisicoquímica, monitoreo y distribución del material particulado fino y grueso en la Región Metropolitana que encargó CONAMA RM en el año 2005. Por esta razón, el PPDA profundiza en el control y reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno, algunos compuestos orgánicos volátiles, óxidos de azufre y amoníaco, los cuales no son los contaminantes principales en Pudahuel. Además, se mantiene control sobre las emisiones de origen primario, especialmente los procesos de combustión que utilizan petróleo diesel, por su alta toxicidad. En resumen, la implementación exitosa de las medidas del PPDA permitiría una reducción cercana a un 60% de las emisiones de MP10 desde fuentes estacionarias y móviles. Sin embargo, no está determinada cual será la reducción de los niveles de concentraciones de MP10, mucho menos su impacto en Pudahuel. Los cuadros siguientes presentan las principales medidas de la actualización del PPDA con probable impacto en Pudahuel.

Cuadro 5-12 Medidas de control y reducción de emisiones para sector transporte con probable impacto en Pudahuel

| Medida general | Medidas específicas |
|---|---|
| Control de emisiones del Transporte Público | - Normas de emisión para buses nuevos: a) EURO III / EPA 98 con Filtro de Partículas (2009) b) EURO IV / EPA 2007 con Filtro de Partículas (2012) - Uso de combustible dentro de especificación |
| Control de emisiones de vehículos pesados | - Normas de Emisión para Vehículos Pesados Nuevos a) EURO III / EPA 98 con Filtro de Partículas (2010) b) EURO IV / EPA 2007 con Filtro de Partículas (2012) - Tecnologías de Control de Emisiones y Registro de Flotas de Vehículos de carga y servicio. - Uso de combustible dentro de especificación |
| Medidas adicionales | - Programa para acelerar el retiro de los vehículos sin sello verde (priorizar por comuna de Pudahuel) - Especificaciones de calidad de combustibles de expendio en la Región Metropolitana |

De acuerdo a la estimación de emisiones de MP10 para Pudahuel, la priorización de medidas debe hacerse para camiones pesados diesel y buses. Sin embargo, las medidas del PPDA están destinadas principalmente a los camiones y buses nuevos; solamente el mejoramiento de los combustibles podría tener un efecto en el corto plazo en la disminución de emisiones. Luego, las medidas podrían tener un impacto en el mediano y largo plazo, en función de la renovación de los vehículos que funcionan con combustible diesel.

En Pudahuel, existen aproximadamente 147 de fuentes industriales con un aporte cercano a 0.5% del total de emisiones anuales para la Región Metropolitana. Luego, las medidas para el sector industrial no deberían tener un mayor impacto en las concentraciones de MP10 en Pudahuel, excepto en los grupos electrógenos de respaldo que corresponden el 79% de las emisiones horarias. Para la comuna de Pudahuel, los esfuerzos deberían concentrarse en las medidas para otras fuentes presentadas en el Cuadro 5-13, específicamente en el control de las emisiones de la fracción gruesa de MP10, entre ellas el programa de aspirado de calles, el control, incremento y mantenimiento de áreas verdes.

Cuadro 5-13 Medidas de control y reducción de emisiones para el sector industrial y otras fuentes con impacto en Pudahuel

| Medida general | Medidas específicas |
|----------------------------|---|
| Modificaciones generales | CONAMA, en conjunto con el Ministerio de Salud, realizarán en el plazo de 6 meses los estudios conducentes a la actualización de las normas de emisión por concentración de material particulado para fuentes estacionarias (priorizar normas para grupos electrógenos). |
| Medidas adicionales | <ul style="list-style-type: none"> - Compensación de emisiones en la industria. (compensar con reducción de emisiones en Pudahuel) - Control de emisiones de precursores de aerosoles orgánicos secundarios en el sector industrial y comercial. - Control de emisiones de grupos electrógenos (corresponderían al 79% de las emisiones horarias en noches de invierno). - Exigencias de compensación para nuevos proyectos (compensar con reducción de emisiones en Pudahuel) |
| Medidas para otras fuentes | <ul style="list-style-type: none"> - Control de emisiones provenientes de equipos de calefacción a leña y pellets de madera. - Programa de erradicación de las quemas agrícolas en la Región Metropolitana (especialmente en la comuna de Pudahuel). - Programa para el control de emisiones de la fracción gruesa del MP10 (áreas verdes, programa aspirado de calles). - Programa de incentivo al uso de vehículos no motorizados (ciclorutas). |
| Medidas complementarias | <ul style="list-style-type: none"> - Sistema de pronóstico de calidad del aire por MP - Programa de seguimiento de contaminación intramuros (es muy probable mayores concentraciones al interior de casas que usan leña y braseros a carbón). - Plan de fiscalización de las medidas del PPDA. - Medidas para episodios críticos de alerta ambiental (aplicadas en Pudahuel). - Programa de fortalecimiento de la gestión ambiental local y acceso a información (especialmente en la comuna de Pudahuel). |

Otras medidas que no están explícitamente consideradas en el PPDA, pero que en Pudahuel es necesario implementar para controlar la fracción gruesa es el mejoramiento de calles y terminales de buses, control y mantenimiento de sitios eriazos y pavimentación de caminos y bermas.

5.8.2 Plan Operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación

El plan de gestión de episodios críticos (PGEC) consta, fundamentalmente, de tres componentes:

- Pronóstico de la calidad del aire para material particulado MP10.
- Control de las fuentes de emisión, a través de la fiscalización permanente y durante las situaciones de episodios críticos.
- Plan comunicacional para la difusión de la calidad del aire, recomendaciones y medidas.

El rediseño del PGEC establece para el período comprendido entre el 1º de abril y el 31 de agosto las siguientes medidas permanentes:

- Restricción vehicular permanente de 4 dígitos para vehículos sin sello verde entre lunes y viernes, exceptuando los feriados.
- Prohibición de quemas agrícolas en toda la Región Metropolitana.
- Programa de aspirado de calles, sujeto a disponibilidad de presupuesto.

Además, cuando se decreta algún episodio crítico por contaminación ambiental se aplicarán en toda la Región Metropolitana las medidas especiales resumidas en el Cuadro 5-14.

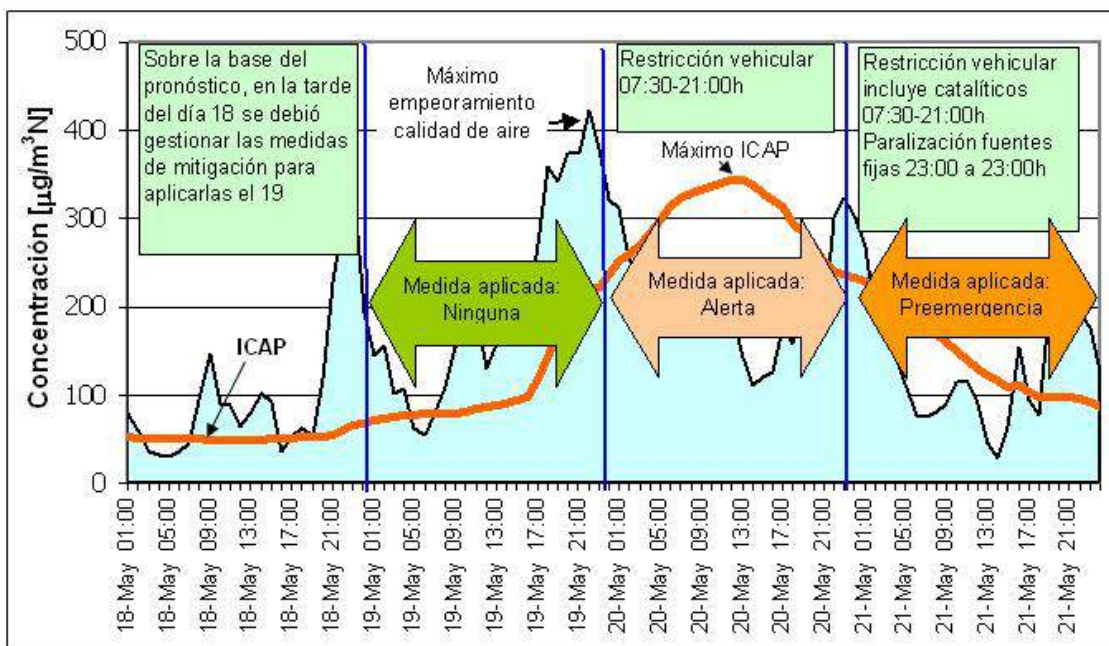
Cuadro 5-14 Medidas especiales durante episodios críticos por MP10 con impacto en Pudahuel

| Episodio crítico | Medidas especiales durante episodios críticos |
|-------------------------|---|
| Alerta Ambiental | El Ministerio de Educación podrá suspender las clases de educación física en los colegios de la región. (suspender clases en la comuna de Pudahuel) Prohibición para el funcionamiento de todo tipo de chimeneas que utilicen biomasa como combustible en toda la Región Metropolitana y se intensificarán las acciones de fiscalización. |
| Pre-emergencia | - Restricción vehicular a 6 dígitos para vehículos sin convertidor catalítico y se aplicará a 4 dígitos para vehículos con convertidor catalítico. - Paralización de fuentes fijas cuyas concentraciones están sobre 32 mg/m ³ N. (17 fuentes en Pudahuel, 14 corresponden a grupos electrógenos) - Se faculta al Ministerio de Educación para suspender las clases de educación física (suspender clases en la comuna de Pudahuel). |
| Emergencia | - Restricción vehicular para los automóviles sin convertidor catalítico se aumenta a 8 dígitos y para vehículos con sello verde 6 dígitos. - Paralización de fuentes fijas cuyas concentraciones están sobre 28 mg/m ³ N. (17 fuentes en Pudahuel, 14 corresponden a grupos electrógenos) - Se mantiene la prohibición para el funcionamiento de chimeneas domiciliarias, además de las otras medidas referidas a suspensión de clases de educación física y de fiscalización. |

De acuerdo al modelo oficial el sistema de pronóstico de episodios de contaminación tiene un carácter preventivo, recomendando la toma de medidas o declaración de episodios críticos para el día siguiente en función del máximo promedio móvil de 24h del día siguiente. En

caso de declararse algún episodio crítico se anuncia alrededor de las 21 horas por televisión y se publica en la página web de la intendencia y CONAMA.

Considerando el ciclo de las concentraciones de MP10 con disminución de valores en la tarde y aumento en la noche y que el promedio móvil de 24h va retrasado con respecto de las concentraciones horarias, en reiteradas ocasiones ha ocurrido que en aquellos episodios de corta duración (1 día) la toma de medidas se realiza cuando el problema ya fue superado al producirse las altas concentraciones durante la noche y se alcanza el máximo promedio móvil de 24h durante la madrugada o mañana del día siguiente (para el cual se decreta el episodio). La Figura 5-56 ilustra un caso real de este problema ocurrido el 26 de mayo de 2006.



Fuente: Elaborado a partir de información presentada por CENMA en comité ampliado del PPDA

Figura 5-56 Desfase entre registros horarios de MP10 e ICAP, episodio 26 de mayo de 2006

En el corto plazo, para evitar el desfase entre concentraciones horarias y máximo promedio móvil de 24h la unidad de modelación y gestión de la calidad de aire de CENMA propone utilizar un promedio fijo de 06 AM a 05 AM del día subsiguiente y adelantar el anuncio de las medidas de episodio a las 18h, alertando aquellas noches cuando se constatan altas concentraciones horarias para evitar la exposición de las personas a estos niveles, especialmente en la comuna de Pudahuel. Además, desarrollar modelos de pronóstico que apunten a los períodos de altas concentraciones, generalmente entre 18h y 23h.

5.8.3 Medidas de gestión de calidad de aire especialmente adecuadas para Pudahuel

La revisión de las propuestas para la Región Metropolitana, tanto de las diversas organizaciones sociales y comunidades de base como del consejo asesor de académicos, tienen muchos temas en común, especialmente las medidas estructurales, entre ellas: el congelamiento de emisiones en la cuenca de Santiago, el incentivo al uso de combustibles más limpios, el incentivo para implementar tecnologías de control y reducción de emisiones, la limitación del crecimiento del parque vehicular, la prohibición de la quema de leña en área urbana durante período abril-agosto, el establecimiento de la norma para MP2,5, la forestación urbana, el límite a la expansión de la ciudad (a costa de la reducción de terrenos agrícolas), el mejoramiento de los combustibles, el mejoramiento del sistema de transporte público, el incentivo al uso de bicicletas, la construcción de ciclovías y el aumento del presupuesto para una mejor gestión y fiscalización. Sin embargo, no existen propuestas específicas para comunas particulares y por ende tampoco para la comuna de Pudahuel.

El análisis de las concentraciones de MP10 y de sus fracciones (fina y gruesa) en Pudahuel muestra que durante los últimos años hay un crecimiento de ambas fracciones. Es decir, a pesar de las medidas de PGEC orientadas al control del MP2,5 (fracción fina) hay un aumento de ésta. Respecto a la fracción gruesa, en el entorno de la estación y en la comuna, hay gran cantidad de polvo que puede ser resuspendido, como por ejemplo calles sin pavimentar, veredas de tierras, calles pavimentadas unidas a bermas de tierra, sitios eriazos, terminales de buses con suelo sin pavimentar. Es preciso por lo tanto implementar medidas para reducir estas emisiones.

Una de las debilidades del plan de gestión de episodios críticos ha sido centrar la discusión en el modelo de pronóstico de episodios; como consecuencia, errores de pronóstico generan sensación de improvisación y un costo económico para toda la Región Metropolitana. Por otra parte, algunas de las medidas implementadas han perdido efectividad con el tiempo, entre ellas la restricción de vehículos sin convertidor catalítico; otras medidas son complejas de fiscalizar en los días de episodio principalmente por falta de personal. Tampoco existen medidas preventivas, especialmente en Pudahuel, para evitar superar el nivel de la norma de 24h, solamente se aplican desde el nivel de alerta.

Durante la campaña de mediciones para determinar la extensión de la zona de altas concentraciones de MP10 realizada durante la noche de días del invierno de 2003, especialmente hacia el norte de la estación Pudahuel, se detectó gran cantidad de sectores con fogatas (uso de maderas, papeles, neumáticos). Además, consultas a vecinos del sector de la

estación de monitoreo en Pudahuel señalan el uso de leña y braseros a carbón durante el comienzo de la noche, los cuales son encendidos y apagados fuera de las casas. Por este motivo, el control de emisiones de quema de leña, es una medida difícil de aplicar y fiscalizar en la comuna de Pudahuel, ya que hay una gran cantidad de casas que utilizan precarios medios para quemar la leña (salamandras y braseros) en vez de estufas de cámara simple o doble cámara. Las medidas a implementar deberían considerar programas de mejoramiento de la aislación térmica de las viviendas y subsidios para la compra de equipos de calefacción que funcionen con combustibles más limpios (gas, electricidad, parafina).

La propuesta de medidas específicas para la comuna de Pudahuel se incluye en las recomendaciones.

6 Conclusiones

El análisis de las concentraciones de MP10 muestra que a pesar de las disminuciones constatadas en todas las estaciones de la red de monitoreo de Santiago (cercanas a 50%), producto de las medidas del plan de prevención y descontaminación para la Región Metropolitana establecido el año 1997, se continúa superando la norma primaria para material particulado para la protección de la salud de las personas.

Las concentraciones de MP10 en todas las estaciones de la red MACAM tienen un marcado ciclo anual, tanto de la fracción fina (menor a 2,5 μm) como de la fracción gruesa (entre 2,5 y 10 μm), con un fuerte aumento de los niveles entre abril y agosto. Durante estos meses, producto de las malas condiciones de ventilación, especialmente durante episodios tipo A, las mayores concentraciones horarias y diarias de MP10 ocurren en Pudahuel llegando a niveles considerados peligrosos para la salud de las personas, lo cual conduce a la aplicación de medidas especiales de control y reducción de emisiones en toda la Región Metropolitana.

Los factores identificados para Pudahuel que generan las concentraciones de MP10 durante días de episodio son los mismos que para el resto de las estaciones de monitoreo en Santiago, es decir factores meteorológicos de escala regional (episodios tipo A y BPF), de escala local (principalmente velocidad y dirección de vientos) y emisiones de material particulado. Sin embargo, el aumento de las concentraciones en períodos de episodio está asociado a cambios en los valores de parámetros específicos de dichos factores.

Se demostró estadísticamente que la velocidad del viento en Pudahuel (muy baja durante las horas de mayor concentración) tiene un patrón de comportamiento distinto al resto de las estaciones durante episodios de tipo A, lo que favorece el aumento de las concentraciones e impide la dispersión de las emisiones desde las fuentes cercanas y aún cuando las direcciones del viento desde las otras estaciones se dirigen hacia Pudahuel, a esas horas el viento en Pudahuel es débil cercano a 0 m/s lo cual dificulta el transporte desde grandes distancias; además, a pocos kilómetros (La Farfana) no se aprecia un aumento similar de las concentraciones.

La mayoría de los episodios tipo A analizados finalizaron con una advección costera, esto es, un aumento de la ventilación y de la capa de mezcla superficial e ingreso de aire húmedo desde la costa, que produce la disminución de las concentraciones en la estación Pudahuel y el resto de las estaciones.

Existe una variabilidad espacial de las concentraciones de MP10 en Santiago y en la comuna de Pudahuel, incluso dentro de la zona de representatividad poblacional de la estación

(radio de 2 km); esta situación puede conducir a adoptar acciones de gestión que no se condicen con la situación real de contaminación ni de la comuna de Pudahuel, ni de la comuna vecina de Cerro Navia, ni de la ciudad. Durante días de episodio tipo A, las estaciones del sector centro y oriente (La Paz, Las Condes y La Florida) suelen tener niveles en rango bueno.

En Pudahuel se emite menos de un 2% del total de emisiones de fuentes industriales y móviles de la Región Metropolitana. Sin embargo, es una de las comunas con mayores niveles de contaminación por MP10. Por este motivo, estimamos que las emisiones no evaluadas, entre ellas la resuspensión de polvo (calles sin pavimentar, veredas de tierras, calles pavimentadas unidas a bermas de tierra, sitios eriazos, terminales de buses con suelo sin pavimentar), el consumo de leña y carbón para calefacción domiciliaria, como también otras fuentes locales que han sido detectadas durante los últimos meses (quema de basura, hornos clandestinos), podrían tener una mayor responsabilidad para explicar las altas concentraciones en la comuna. Otra fuente no evaluada a considerar en futuros estudios son las emisiones asociadas al Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, ubicado a unos 5 km al norponiente de la estación, tanto por sus aportes en emisiones directas de los aviones durante el despegue, como por las emisiones de las fuentes móviles que se trasladan hacia y desde el aeropuerto cruzando la comuna.

El promedio de las concentraciones de MP10 para los meses primavera-verano en Pudahuel se ha mantenido durante los últimos años por sobre el valor de la norma anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Por lo tanto para su cumplimiento y disminuir el riesgo de la población a adquirir enfermedades crónicas (OMS establece un promedio anual de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ para evitar cáncer al pulmón o enfermedades cardiopulmonares), no es suficiente con la implementación de medidas de control y reducción de emisiones de MP10 durante los meses de otoño-invierno, sino que además se requiere establecer medidas permanentes u otras especialmente diseñadas para los meses de primavera-verano.

Finalmente, los resultados de este trabajo muestran que el aumento de las concentraciones de MP10 en períodos de episodios, que también ocurre en otras estaciones de monitoreo, pero con menor intensidad, apuntan a la existencia de una componente local (emisiones locales de MP10) que no ha sido suficientemente estudiada y que justifica gestionar de manera distinta el problema de la contaminación por MP10 en Pudahuel; situación similar podría estar ocurriendo en la estación de monitoreo cercana, ubicada en Cerro Navia. Todo ello justifica también que no se deba gestionar la calidad del aire en toda la ciudad de Santiago en función de Pudahuel.

7 Recomendaciones

Entre 1997 y 2007, la población de la comuna de Pudahuel aumentó en un 34%, llegando a 250.000 habitantes, siguiendo la tendencia de Quilicura, Maipú y Puente Alto. Con las recientes modificaciones realizadas al Plan Regulador Municipal de Pudahuel, se espera que la comuna duplique la población en un plazo de 10 a 15 años (Covarrubias, 2008). En este aspecto, las conclusiones de este trabajo, y considerando además los daños y costos en salud, nuestra recomendación sería desincentivar el crecimiento de la población y expansión de la comuna de Pudahuel.

De acuerdo a los indicadores del sistema nacional de información municipal (www.sinim.cl) la comuna de Pudahuel tiene 3,26 m² por habitante de áreas verdes; en comparación, comunas como Las Condes y Vitacura tienen 5,9 y 9,4 m², respectivamente. Nuestra recomendación apunta a duplicar, al menos, el número de áreas verdes, lo cual ayudará a disminuir y controlar las emisiones de la fracción gruesa del MP10.

Por otra parte, se recomienda incentivar el desarrollo de sistemas de mitigación y control para fuentes de bajas emisiones. Una gran cantidad de estas fuentes (panaderías, lavasecos, talleres de pintura, estaciones de servicio, cocinerías) ya sea por su cercanía o por estar insertas en sectores residenciales tienen un mayor impacto en las concentraciones de MP10 que respiran los pobladores, especialmente en los días de episodio con fuerte estabilidad atmosférica y malas condiciones para la dispersión de los contaminantes.

Las medidas del nuevo PPDA están enfocadas al control de precursores de aerosol secundario y a la disminución de las emisiones primarias en toda la Región Metropolitana, lo cual no tendría un mayor impacto en la comuna de Pudahuel, en función de las emisiones originadas en la comuna, especialmente en los días de episodio. Por ello, recomendamos medidas específicas para disminuir las emisiones de MP10 y por ende la exposición de las personas, entre ellas:

- Campañas de educación para cambiar conductas referidas a emisiones de MP10 por parte de la población, entre otras: el uso de braseros, quema de leña, quema de hojas durante el otoño, barrido de veredas sin previa humectación.

- Evitar el traslado de enfermos o personas de riesgo broncopulmonar o cardiovascular (niños y ancianos) a las horas de altas concentraciones (noches y mañanas), a menos que sea una situación de riesgo vital.

- Establecer mecanismos de difusión masiva (Internet, radios y canales de televisión comunales o vecinales, llamados a colegios y otros) que informen los horarios en que se

registran altas concentraciones de MP10 para evitar la exposición y actividad física durante esos períodos.

- Reponer pavimento en calles deterioradas, pavimentación de calles de tierra, estabilización de bermas y mejorar accesos a los terminales de buses, a fin de controlar y disminuir las emisiones de fracción gruesa de MP10. Implementar un programa permanente de aspirado de calles utilizando camiones aspiradores que cumplan, por ejemplo, la normativa del Estado de California (USA) para aspirado de MP10.

- Mejorar la fiscalización a nivel municipal de los organismos públicos en Pudahuel durante días de episodio.

- Crear comités o juntas de vigilancia a nivel vecinal para denunciar malas prácticas (quema de hojas, uso de chimeneas a leña, panaderías u otras fuentes que usen leña).

- Incentivar el desarrollo e instalación de sistemas de mitigación y control para fuentes de menores emisiones (panaderías, lavasecos, talleres de pintura, estaciones de servicio, cocinerías).

- Establecer programas de mejoramiento de aislación térmica de las viviendas y subsidios para la compra de equipos de calefacción que funcionen con combustibles más limpios (gas, parafina, electricidad).

- Compensación de emisiones de proyectos nuevos y antiguos con reducciones de emisiones en Pudahuel, priorizando el control de la fracción gruesa mediante pavimentación y aumento de áreas verdes.

8 Referencias bibliográficas

ALLIENDE, F. 2004. El plan de prevención y descontaminación atmosférica de la Región Metropolitana de Chile – Trayectoria y perspectivas.

ALVARADO, G. 2007. Estimación del aporte de diferentes fuentes a la contaminación atmosférica por partículas en Santiago, mediante un modelo de balance de masas de elementos químicos. Memoria de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile.

ARTAXO, P. 1996. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1996. Estudio para CONAMA RM. 48p.

ARTAXO, P. 1998. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1998. Estudio para CONAMA RM. 61p.

ARTAXO, P. 1999. Final Report Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile - 1999. Santiago, CONAMA RM. 69p

ARTAXO, P., OYOLA, P y MARTINEZ, R. 1999. Aerosol composition, Size Distribution, and Source Apportionment in Santiago de Chile. Nuclear Instruments and Methods B, 150:409-416.

ASRM, 2008. Historia de la red MACAM. [en línea]. Santiago, SEREMI Salud. <http://www.seremisaludrm.cl/sitio/pag/aire/Indexjs3airesist_monit.asp> [consulta: 26 octubre 2008].

BARRIENTOS, V. 2001. Análisis de Medidas Contenidas en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana. Memoria de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 81p.

BELL, M., DAVISB, D., GOUVEIAC, N., BORJA-ABURTO, V. y CIFUENTES, L. 2006. The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, Sao Paulo, and Mexico City. Environmental Research 100 (2006) 431–440

BELMAR, R. 1991 Estudio epidemiológico sobre efectos de la contaminación atmosférica, Enfoques en atención primaria, primer semestre.

CACERES, J. 2000. Diagnóstico y Rediseño del Sistema de Manejo de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. Memoria de Ingeniero Civil Industrial. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 248p.

CAKMAK, S., DALES RS. y BLANCO C. 2007. Air pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly. Environmental Health Perspectives. 115(4): 524 – 527p

CASSMASSI, J. 2000. Improvement of the Forecast of Air Quality and the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region, Technical report number 4. Santiago, CONAMA. 54p.

CENMA, 2005. Análisis Comparativo de Condiciones Meteorológicas Asociadas a Episodios de Contaminación Atmosférica en Santiago, durante los períodos de otoño-invierno 1997 a 2005. Informe elaborado para CONAMA RM. Septiembre de 2005.

CENMA, 2008. Análisis Comparativo de Condiciones Meteorológicas Asociadas a Episodios de Contaminación Atmosférica en Santiago, durante los períodos de otoño-invierno 1997 a 2008. Informe elaborado para CONAMA RM. Septiembre de 2008.

CENMA, 2008b. Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de la Región Metropolitana, Año Base 2007. Informe elaborado para CONAMA. Diciembre de 2008.

CIFUENTES, L., L. LAVE, VEGA, J. y KOPFER, K. 2000. Effect of the fine fraction of particulate matter vs the coarse mass and other pollutants on daily mortality in Santiago, Chile. Journal of the Air & Waste Management Association, 50:1287-1298

CONAMA, 1997. Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.conama.cl/rm/568/articles-932_PPDA.zip> [consulta: 26 octubre 2002].

CONAMA, 2001. Anteproyecto de Revisión, Reformulación y Actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.conama.cl/rm/568/articles-932_anteproyecto.zip> [consulta: 26 octubre 2002].

CONAMA, 2008. Anteproyecto de Revisión, Reformulación y Actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.conama.cl/rm/568/articles-932_anteproyecto.zip> [consulta: 2 julio 2009].

CONAMA, 2009. Segunda Actualización del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de Santiago. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <<http://www.conama.cl/rm/568/article-34635.html>> [consulta: 2 julio 2009].

CONAMA, 2009b. Plan operacional para la gestión de episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado respirable (MP10) en la Región Metropolitana. Período 2009. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.sinia.cl/1292/articles-45436_PlanEpisodisoCriticos2009.pdf> [consulta: 2 julio 2009]

COVARRUBIAS, M. 2008. Temas Públicos Nº 877 - 11 de Julio de 2008 ISSN 0717-1528

DE LA VEGA, V., FUENTES, H., ORTIZ, J. Y PRÉNDEZ, M. 1987. Balance de masa en aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile. Bol. Soc. Chil. Quím., 32, 187-197.

DICTUC, 2007. "Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005". [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.conama.cl/rm/568/articles-41184_Dictuc0ActuaizalforFinal.pdf> [consulta: 11 marzo 2008].

DIMEC, 2007a. Actualización de Factores de Emisión Para Vehículos Livianos y Medianos. Informe Final. Departamento de Ingeniería Mecánica de la U. de Chile.

DIMEC, 2007b. Investigación de Factores de emisión Para Vehículos de Carga. Informe Final. Departamento de Ingeniería Mecánica de la U. de Chile.

FUENZALIDA, H. 1961. "Estudio sobre la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago". Memoria de Título, Ingeniero Civil Industrial, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, Universidad de Chile.

GARREAUD, R., RUTLLANT, J. y FUENZALIDA, H. 2002. Coastal lows along the subtropical west coast of South America: mean structure and evolution. Monthly Weather Review 130, 75–88.

GARREAUD, R. y RUTLLANT, J. 2003. Coastal lows along the subtropical west coast of South America: numerical simulation of a typical case. Monthly Weather Review 131, 891–908.

GIL, L., ADONIS, M. y SILVA, M. 1991. Riesgos para la salud humana por la exposición a contaminantes de alta toxicidad en el aire de Santiago. Ambiente y Desarrollo. 64 – 70.

GRAMSCH, E., CERECEDA-BALIC, F., OYOLA, P. y VON BAER, D. 2006. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM10 and Ozone data. Atmospheric Environment 40: 5464–5475

GRAMSCH, E. 2006a. Análisis Retrospectivo de Filtros de Material Particulado MP10 en sus fracciones fina y gruesa para estaciones de la Red MACAM2 II en el período 2003-2006. Informe Final, Diciembre 2008. Estudio elaborado por USACH para CONAMA.

GRAMSCH, E., OYOLA, P., VON VAER, D. y ORMEÑO, I. 2008. Impact of the use of segregated streets in the elemental carbon concentrations in Santiago de Chile. *Atmósfera* 21(1), 101-120

GRASS, D. y CANE, M. 2007. The effects of weather and air pollution on cardiovascular and respiratory mortality in Santiago, Chile, during the winters of 1988-1996. *International Journal of Climatology* Volume 28, Issue 8, Pages 1113 – 1126.

HIDY, G., y BROCK, J. 1971. An assessment of the global sources of tropospheric aerosol, En: PROCEEDINGS OF THE 2nd international clean air congress, New York 1971.

HIDY, G., y FRIENDLANDER, S. 1971. The nature of the Los Angeles aerosol. In Proceedings of the Second International Clean Air Congress, H.M. Englund and W.T. Beery, Eds. Academic Press, New York, pp. 391-404.

ILABACA, M., OLAETA, I., CAMPOS, E., VILLAIRE, J. y TELLEZ-ROJO, M. 1999. Association between levels of fine particulate and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago, Chile. *J Air Waste Manag Assoc* 49:154–163.

JORQUERA, H. 2002. Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach I. Carbon monoxide, nitrogen oxides and sulfur dioxide. *Atmospheric Environment* 36: 315–330

JORQUERA, H. 2002. Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach II. PM_{2,5}, coarse and PM₁₀ particulate matter fractions. *Atmospheric Environment* 36: 331–344

JAENICKE, R., 1980. Atmospheric aerosols and global climate, *J. Aerosol Sci.* 11: 577-588.

KOUTRAKIS, P., SAX, S., SARNAT, J., COUL, B., DEMOKRITOU, P., OYOLA, P, GARCIA, J. y GRAMSCH, E., 2005. Analysis of PM₁₀, PM_{2,5}, and PM_{2,5-10} concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001. *Air & Waste Management Association*, 55:342-351.

MANCILLA, P. 1998. Aplicación de modelo de receptor en la Región Metropolitana. Memoria de Ingeniero Industrial Químico. Pontificia Universidad Católica de Chile.

MATAMALA, L. 1998. Analysis of the 1996 Air Quality Data for Santiago-Chile, and its Implication to the Air Pollution Decontamination Plan of The City. En: AIR & WASTE Management Association's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14-18, 1998, San Diego, California. 13p.

MCMURRY P., WOO K., WEBER, R., CHEN D., and PUI, D. 2000. Size distributions of 3 to 10 nm atmospheric particles: implications for nucleation mechanisms. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* 358: 2625-2642.

MOLINA, M. Y MOLINA, L., 2004. Megacities and Atmospheric Pollution. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 54:644–680.

MORATA, D. POLVE, M, VALES, A. BELMAR, M. *et al.* 2007. Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE–SEM–EDX study. *Environ Geol* DOI 10.1007/s00254-007-1141-8

MUÑOZ, R., GARREAU, R., FUENZALIDA, H. y SCHMITZ, R. 2003. Meteorología y Modelación de la Calidad del Aire en la Región Metropolitana. Informe Final. Estudio elaborado para CONAMA RM. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.

ORTIZ, J., APABLAZA, N., CAMPOS, C., ZOLEZZI, S. and PRENDEZ, M. 1993. Tropospheric Aerosols Above the Thermal Inversion Layer of Santiago, Chile: Size distribution of Elemental Concentration. *Atmospheric Environment* 27A(3).

ONDOV, J. M. y WEXLER, A. S. 1998. Where Do Particulate Toxins Reside? An Improved Paradigm for the Structure and Dynamics of the Urban Mid-Atlantic Aerosol. *Environ. Sci. Technol.* 32:2547-2555.

OSTRO, B., SANCHEZ, JM., ARANDA, C. y ESKELAND, G. 1996. Air Pollution and Mortality: Result form a Study of Santiago, Chile. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 6:97-114.

OSTRO, B., ESKELAND, G., SANCHEZ, J., FEYZIOGLU T., 1999. Air pollution and health effects: A study of medical visits Among Children in Santiago, Chile. *Environmental Health Perspectives.* 107(1): 69-73p.

PEREZ-ROA, R., CASTRO, J., JORQUERA, H., PEREZ-CORREA, J.R. y VERSOVIC, V. 2006. Air pollution modelling in an urban area: Correlating turbulent difusión coefficients by means of an artificial neural approach. *Atmospheric Environment* 40:109-125

PINO, P., WALTER, T., OYARZUN, M., VILLEGAS, R., ROMIEU, I., 2004. Fine particulate matter and wheezing illnesses in the first year of life. *Epidemiology* 15, 702–708.

PIZARRO, R. 2001. Contaminación Atmosférica de la Región Metropolitana. Santiago, Publicaciones Terram. [en línea] Santiago, Terram. <<http://www.terram.cl>> [consulta: 27 octubre 2002]

PRENDEZ, M., ORTIZ, J., CORTES, E. y CASSORLA, V. 1984. Elemental composition of the airborne particulate matter from Santiago City, Chile, 1976. *J. Air Pollut. Control Ass.* 34, 54-56.

PRENDEZ, M. 1993. Características de los Contaminantes Atmosféricos. En: Sandoval, H. Préndez, M. y Ulriksen, P. (Eds). *Contaminación Atmosférica de Santiago: Estado Actual y Soluciones*. Santiago, Universidad de Chile y Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana. pp. 109-186.

PRENDEZ, M., CORVALAN, R. Y CISTERNAS, M. 2007. Caracterización física y química del material particulado de fuentes estacionarias: incidencia sobre la aplicación de un sistema de compensación de emisiones en la Región Metropolitana de Santiago. *Revista Internacional Tecnológica, CIT*, Vol 18 (2),39-103.

PROSPERO, J. M. y CHARLSON, R. 1983. The atmospheric Aerosol System: A Review. *Review of Geophysics and Space Physics.* 21 (7): 1607 – 1629.

QUE PASA, 1997. Tiempo modernos – información contaminada. Revista Que Pasa. Número 1373. 5 al 11 de agosto de 1997.

RAPPENGLÜCK, B., SCHMITZ, R., BAUERFEIND, M., CERECEDA-BALICB, F., VON BAER, D., JORQUERA, H., SILVA, Y. y OYOLA, P. 2005. An urban photochemistry study in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment* 39: 2913–2931

ROJAS, C., ARTAXO, P. y VAN GRIEKEN, R. 1990. Aerosols in Santiago de Chile: A study using receptor modelling with X-ray fluorescence and single particle analysis. *Atmospheric Environment* 24B (2): 227-241.

RUTLLANT, J. 1973. Factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago. Resultados de mediciones 1971-1972. Publicación No. 164, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

RUTLLANT, J. y SALINAS, H. 1983. Caracterización meteorológica de situaciones de alto potencial de contaminación atmosférica en Santiago. *Tralka*, 2(1):57-16

RUTLLANT, J., GARREAUD, R., CAMPOS, E Y ACEITUNO, P. 1993. Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting. Preprints, IV International Conference on Meteorology and Oceanography of the Southern Hemisphere, Hobart, Australia, marzo 1993. *Amer. Meteorol. Soc*

RUTLLANT, J. y GARREAUD, R. 1995. Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment* 34: 223-244.

RUTLLANT, J. y GARREAUD, R., 2004. Episodes of strong flow down the western slope of the subtropical Andes. *Monthly Weather Review* 132, 611–622.

SAMET, J. M. *et al.* 2000. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States, *Res.Rep.Health Eff.Inst.*, vol. 94, no. Pt 2, pp. 5-70.

SANHUEZA, P., VARGAS, C., JIMÉNEZ, J. 1999. Daily mortality in Santiago and its relationship with air pollution. *Rev. Med Chil* feb;127(2):235-242.

SAX, S., KOUTRAKIS, P., RUIZ, P., CERECEDA-BALIC, F., GRAMSCH, E. y OYOLA, P. 2007. Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 57:845–855

SCHMITZ, R. 2004. Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment* 39: 2035-2047.

SIENRA, M., ROSAZZA, N. y PRENDEZ, M. 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their molecular diagnostic ratios in urban atmospheric respirable particulate matter. *Atmospheric Research* 75: 267–281

SIENRA, M. 2006. Oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air particulate matter. *Atmospheric Environment* 40: 2374–2384.

SIENRA, M. y ROSAZZA, N. 2006. Occurrence of nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in urban particulate matter PM10. *Atmospheric Research* 81: 265–276.

SILO C. y LISSI E., 1982. *Proceedings Fifth Clean Air Conference Buenos Aires, Argentina*, pg. 1267-1269.

STOCKER, S. y SEAGER, S. 1981. *Contaminación Ambiental: Contaminación del aire y del agua*. Barcelona, Edit. Blume. 293p.

TSAPAKIS, M., LAGOUDAKI, E., STEPHANOU, E., KAVOOURAS, I., KOUTRAKIS, P., OYOLA, P. y VON BAER, D. 2002. The composition and sources of PM2,5 organic aerosol in two urban areas of Chile. *Atmospheric Environment* 36: 3851-3863.

TRIER, A. 1984. Observations on inhalable atmospheric particulate in Santiago, Chile, *J. Aerosol Science*, 15: 419-421.

TRIER, A., y SILVA, C. 1987. Inhalable urban atmospheric particulate matter in a semi-arid climate: the case of Santiago de Chile. *Atmospheric Environment*, 21: 419-983.

U de CHILE, 1985. *Estudio de Caracterizaciones Físicas y Químicas de Partículas en Suspensión en la Región Metropolitana para determinar el aporte de las fuentes emisoras a los niveles de concentración de material particulado de Santiago*. Informe Final.

ULRIKSEN, P. 1980 Variaciones diarias de la altura de la capa superficial de mezcla sobre Santiago. *Tralka* 1 (2):143-151.

ULRIKSEN, P., ROSENBLUTH, B. y MUÑOZ, R. 1992. Caracterización de episodios de contaminación atmosférica en Santiago y su pronóstico mediante modelos estocásticos. Informe Final Proyecto FONDECYT 1192-91, Marzo 1992.

ULRIKSEN, P. 1993. Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica de Santiago. En: Sandoval, H. Préndez, M. y Ulriksen, P. (Eds). *Contaminación Atmosférica de Santiago: Estado Actual y Soluciones*. Santiago, Universidad de Chile y Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana. pp. 37-60.

USACH, 2006. Análisis Retrospectivo de Filtros de Material Particulado MP10 en sus fracciones fina y gruesa para estaciones de la Red Macam II en el período 2003-2006. [en línea]. Santiago, CONAMA RM. <http://www.conama.cl/rm/568/articles-41184_UsachTendenciaFinal.pdf> [consulta 11 marzo 2008]

US EPA, 1996a. Air Quality Criteria for Particulate Matter; EPA/600/P-95/001cF; U.S. Environmental Protection Agency, Office of Health and Environmental Assessment: Research Triangle Park, NC, 1996.

USEPA. 2001. Air Quality Criteria for Particulate Matter (Third external review draft). [en línea], National Center for Environmental Assessment, USEPA <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/partmatt.cfm>> [consulta 28 octubre 2007]

US EPA, 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA/600/P-99/002aF. Research Triangle Park, NC, October 2004.

VILLENA, M., VILLENA, M. Y CHAVEZ, C. 2007. Análisis general del impacto económico y social del rediseño del plan para enfrentar episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado respirable en la Región Metropolitana. Informe final. Estudio elaborado para CONAMA RM,

WHITBY, K. T. 1978. The physical characteristics of sulfur aerosols. Atmos. Environ. 12: 135-159.

WHO, 2000. Air quality guidelines for Europe; second edition Copenhagen, [en línea]. WHO Regional Office for Europe. European series; No 91

<http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_4> [consulta 5 septiembre 2003]

WHO, 2005. Air quality guidelines global update 2005. [en línea]. Report on a working group meeting. Bonn, Germany, 18-20 october 2005.

<www.euro.who.int/Document/E87950.pdf> [consulta 5 julio 2006]

WOO, K., CHEN, D., PUI D. and MCMURRY, H. 2001. Measurement of Atlanta aerosol size distributions: observations of ultrafine particle events. Aerosol Sci. Technol. 34: 75-87.

9 Anexos

ANEXO Plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación

Ministerio Secretaría General de la Presidencia

REVISIÓN, REFORMULA Y ACTUALIZA EL CAPITULO XIV, "PLAN OPERACIONAL PARA ENFRENTAR EPISODIOS CRITICOS DE CONTAMINACION", DEL DECRETO N° 58 DE 2003, QUE REFORMULO Y ACTUALIZO EL PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA (PPDA)

Núm. 46.- Santiago, 5 de marzo de 2007.- Vistos: Lo establecido en la Constitución Política de la República, en sus artículos 19 N° 8 y N° 9 y 32 N° 8, en la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente; el decreto supremo N° 94 de 1995, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que aprueba el Reglamento que fija el Procedimiento y Etapas para Establecer Planes de Prevención y de Descontaminación; en el decreto supremo N° 131 de 1996, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que declaró Zona Saturada por ozono, material particulado respirable, partículas totales en suspensión y monóxido de carbono, y Zona Latente por dióxido de nitrógeno, la zona correspondiente a la Región Metropolitana; en el decreto supremo N° 59 de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que establece la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado Respirable MP 10, en especial los valores que definen situaciones de emergencia; en el decreto supremo N° 58 de 2003, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que Reformuló y Actualizó el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana; en el decreto con fuerza de ley N° 725 de 1968, Código Sanitario; en los decretos supremos N° 32 de 1990, N° 322 de 1991, N° 4 de 1992, N° 59 de 1998 y N° 811 de 1993, todos del Ministerio de Salud; en las resoluciones N° 51.916 de 20 de diciembre de 2006, y N° 4.729 de 6 de febrero de 2007, ambas de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana; en la Ley N° 18.290, en el decreto supremo N° 18 de 2001, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; en la Ley N° 19.175, Orgánica Constitucional sobre Gobierno y Administración Regional; en los decretos supremos N° 100 de 1990 y N° 584 de 2006, ambos del Ministerio de Agricultura; en la resolución exenta N° 2.128 de 28 de agosto de 2006, de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, que dio inicio al proceso de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación" del PPDA; en la resolución exenta N° 3.285 de 11 de diciembre de 2006, de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, que aprobó el anteproyecto de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV antes mencionado; en el informe del Consejo Consultivo Regional de la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago, de fecha 30 de enero de 2007; en el informe del Consejo Consultivo Nacional de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, de fecha 9 de marzo de 2007; en el informe de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago, de fecha 1 de marzo de 2007; en el acuerdo N° 335 del Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, de fecha 15 de marzo de 2007; las publicaciones practicadas durante el proceso de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV del Plan; los estudios científicos y el Análisis General del Impacto Económico y Social del Plan (AGIES); las observaciones formuladas en la etapa de consulta al anteproyecto de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV; el análisis de las señaladas observaciones y los demás antecedentes, datos y documentos contenidos en el expediente público de la Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación"; y lo dispuesto en la resolución N° 520 de 1996 de la Contraloría General de la República, que fija el texto refundido, coordinado y sistematizado de la resolución N° 55 de 1992, del mismo órgano controlador; y

Considerando:

1° Que, por decreto supremo N° 131 de 1996, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, se declaró a la Región Metropolitana de Santiago, como zona saturada por ozono, material particulado respirable, partículas totales en suspensión y monóxido de carbono, así como zona latente por dióxido de nitrógeno.

2° Que, declarada zona saturada y latente la Región Metropolitana, y de conformidad con lo dispuesto en el artículo 44 de la Ley 19.300 y en el decreto supremo N° 94 de 1995, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, se elaboró el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA), aprobado mediante el decreto supremo N° 16 de 1998, del mismo Ministerio, cuyo objetivo consistía en lograr el cumplimiento de las normas de calidad del aire mediante la reducción de las emisiones de los contaminantes normados y sus precursores, de manera de proteger la salud de la población y el medio ambiente.

3° Que, mediante el decreto supremo N° 58 de 2003, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, se Reformuló y Actualizó el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana, y se derogó el decreto supremo N° 16 mencionado en el considerando anterior.

4° Que, el mismo Plan de Prevención y Descontaminación antes mencionado estableció la obligación de ser revisado y actualizado, al menos en dos oportunidades, con el propósito de complementar y/o mejorar, en lo que fuere necesario, los instrumentos y medidas incluidos en él, así como de incorporar nuevos instrumentos, si se estimaren necesarios para el cumplimiento de las metas de calidad del aire propuestas, todo ello sin perjuicio de los demás procesos de modificación que sean necesarios para mejorar las medidas y los instrumentos incluidos actualmente en el Plan, e incorporar otros nuevos.

5° Que el Capítulo XIV del PPDA regula el denominado "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación" por Material Particulado Respirable MP 10, en el cual se establecen las medidas destinadas a enfrentar los períodos Otoño - Invierno en la Región Metropolitana, cuando las condiciones de ventilación se hacen más desfavorables; así como para enfrentar las situaciones de Alerta, Preemergencia y Emergencia Ambiental, definidas como niveles 1, 2 y 3, respectivamente, en el decreto supremo N° 59 de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

6° Que la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación fue diseñada para reducir la exposición de la población a altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, por lo que durante el período invernal se implementan medidas tendientes a reducir las concentraciones de contaminantes, especialmente, en aquellos días con malas condiciones de ventilación de la cuenca, en que se generan situaciones de emergencia por material particulado respirable MP 10.

7° Que, en atención a nuevos antecedentes e informes recopilados durante los últimos años acerca de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana, y como resultado de un amplio y continuo esfuerzo destinado a la reformulación del PPDA en aquellas materias que

requieren actualización y perfeccionamiento, se ha estimado oportuno y necesario proceder a la reformulación integral del Capítulo XIV mencionado en el párrafo anterior, de manera de rediseñar las medidas de control vigentes para enfrentar el período otoño-invierno en la Región Metropolitana, y de esta forma, reducir la exposición de la población a niveles de concentración considerados críticos por el decreto supremo N° 59 de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

8° Que, el objetivo principal de esta modificación, consiste en mejorar la gestión y fiscalización integral del referido Plan Operacional y ajustar sus medidas, de forma tal de adecuarse a los cambios registrados en las fuentes que paralizan durante los episodios críticos de contaminación en la Región Metropolitana y la progresiva menor ocurrencia de episodios de alta contaminación, considerando a éste último respecto que durante el año 2006 sólo se registraron tres eventos de preemergencia y catorce alertas ambientales, mientras que en el año 1997 las preemergencias fueron treinta y siete, las alertas treinta y ocho, y las emergencias ambientales cuatro. Adicionalmente, se consideró conveniente mejorar las capacidades institucionales de coordinación y gestión para obtener una implementación eficaz de las medidas incluidas en la Gestión de Episodios Críticos.

9° Que, teniendo presente los objetivos antes descritos, la Dirección Ejecutiva de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, mediante resolución exenta N° 2.128 de 28 de agosto de 2006, publicada en el Diario Oficial el 01 de septiembre de 2006, y en el diario La Nación el 3 de septiembre de 2006, dio inicio al proceso de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación" del PPDA.

10° Que en la etapa de elaboración del Anteproyecto respectivo se acompañaron estudios científicos, informes y otros antecedentes, los que debidamente agregados al expediente, permitieron confirmar que las medidas incluidas en el Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación", requerían actualizarse y perfeccionarse en diversos aspectos.

11° Que en el proceso de revisión, reformulación y actualización del Capítulo XIV, Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos por Material Particulado, se procedió a la consulta ciudadana, de acuerdo a los mecanismos establecidos por la ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y el Reglamento para elaboración de Planes de Prevención y Descontaminación.

12° Que, por su parte, tanto en el Consejo Consultivo Regional, como en el Consejo Consultivo Nacional y en la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago, hubo consenso general en orden a aprobar el proyecto de Revisión, Reformulación y Actualización del Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación" del PPDA.

13° Que, finalmente, el Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente aprobó el proyecto definitivo de revisión, reformulación y actualización del Capítulo XIV del PPDA, mediante Acuerdo N° 335 del 15 de marzo de 2007.

Decreto:

Artículo único.- Reemplázase el Capítulo XIV, "Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación" del decreto supremo N° 58 de 2003, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que Reformuló y Actualizó el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana, en la forma que a continuación se especifica:

"CAPITULO XIV

PLAN OPERACIONAL PARA ENFRENTAR EPISODIOS CRITICOS DE CONTAMINACION

Artículo 77.- Para los efectos de la gestión de episodios críticos por Material Particulado Respirable MP 10, se entenderá por:

- a) **Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos:** Conjunto de medidas y acciones que tienen por objeto enfrentar los episodios críticos de contaminación por Material Particulado Respirable MP10.
El Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos se estructura a partir de los siguientes componentes:
 - a.1 Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, que corresponde a la Red de Monitoreo en línea de la calidad del aire, operada por la Autoridad Sanitaria.
 - a.2 Sistema de Pronóstico, que corresponde a la metodología de pronóstico de los niveles de calidad del aire en la Región Metropolitana, aprobada por la Autoridad Sanitaria Regional.
 - a.3 Medidas Permanentes y de Episodios Críticos, que corresponde al conjunto de medidas aplicables durante el Período de Gestión de Episodio Críticos.
 - a.4 Plan Comunicacional, definido en el literal e) del presente Artículo.
 - a.5 Programa Integrado de Fiscalización, definido en el literal f) del presente Artículo.
- b) **Período de Gestión de Episodios Críticos:** Lapso de tiempo comprendido entre el 1 de abril y 31 de agosto de cada año, ambos días inclusive.
- c) **Entidad Coordinadora:** Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago (COREMA RM), a quien le corresponderá la articulación de los distintos Servicios Públicos que participan en la gestión del Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos de Contaminación.
- d) **Metodología de Pronóstico de Calidad del Aire:** Aquella aprobada conforme al procedimiento establecido en el título IV, "Metodologías de Pronóstico y Medición", específicamente en los artículos N° 4 y 5, del D.S. N° 59 de 1998 y sus modificaciones, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES).
- e) **Plan Comunicacional:** Conjunto de mecanismos de difusión cuya finalidad es informar oportuna y debidamente a la comunidad respecto del Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos, para lograr un adecuado nivel de acatamiento de las medidas de restricción y promover conductas tendientes a reducir los niveles de exposición.
- f) **Programa Integrado de Fiscalización para la Gestión de Episodios Críticos:** Conjunto de acciones orientadas a la adecuada implementación de las medidas del Plan de Gestión de Episodios Críticos y al aseguramiento de su acatamiento. El Intendente, en su calidad

de Presidente de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago (COREMA RM), junto a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y los servicios competentes, coordinará la ejecución intersectorial de dicho Programa.

El Programa Integrado de Fiscalización requerirá por parte de los servicios competentes, según corresponda, del envío al Intendente Regional, de un reporte semanal de los resultados de la fiscalización de las medidas aplicadas durante todo el transcurso del Periodo de Gestión de Episodios Críticos. Este informe semanal, se consolidará al final de cada periodo.

MEDIDAS PERMANENTES PARA EL PERIODO DE GESTION DE EPISODIOS CRITICOS

Artículo 78.- Durante el Periodo de Gestión de Episodios Críticos por Material Particulado Respirable (MP10) se aplicarán las siguientes medidas permanentes:

a) Plan de Gestión de Tránsito.

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de la SEREMI de Transportes de la Región Metropolitana, diseñará, dispondrá e implementará, de acuerdo a sus competencias, un Plan de Gestión de Tránsito que considere las medidas tendientes a agilizar los viajes y compensar los eventuales efectos de la reducción de oferta de transporte, producto de la restricción vehicular, durante el periodo de Gestión de Episodios Críticos. Para este efecto, se coordinará la implementación de dicho Plan con la Subsecretaría de Transportes, la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT), la Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA), la Intendencia Regional, las Municipalidades y demás organismos que correspondan.

El Plan de Gestión de Tránsito podrá establecer entre otras medidas, la prohibición de estacionamiento, sentidos y horarios exclusivos para el uso de vías por el Transporte Público. Lo anterior, de acuerdo a las potestades conferidas a los organismos a cargo de la implementación de dicho Plan.

El detalle de las medidas consideradas en este Plan, deberá ser presentado al Intendente Regional, en el mes de marzo de cada año.

b) Restricción Vehicular.

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones dispondrá, en ejercicio de sus atribuciones, la restricción vehicular de carácter permanente durante el Periodo de Gestión de Episodios Críticos, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla N°1:
Restricción Vehicular permanente desde el 1 de abril al 31 de agosto de cada año

| Tipo de Vehículo | Número de dígitos totales por día de lunes a viernes excepto festivos (ambos días inclusive) | Número de dígitos totales por día Sábado, Domingo y festivos |
|--|--|--|
| Automóviles, station wagons y similares, motocicletas y similares, taxis, cualquiera sea la modalidad de servicio, SIN SELLO VERDE | 4 | No tiene |
| Buses de transporte privado de personas, buses interurbanos y rurales, SIN SELLO VERDE | 4 | No tiene |
| Transporte de carga, SIN SELLO VERDE | 4 | No tiene |
| Transporte escolar, SIN SELLO VERDE | 4 | 5 |

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de la Secretaría Regional Ministerial de Transportes y Telecomunicaciones de la Región Metropolitana, deberá definir las fechas, horarios, zonas, perímetros especiales y excepciones a la aplicación de esta medida.

c) Fiscalización del cumplimiento del D.S. 100/1990 del Ministerio de Agricultura.

El Ministerio de Agricultura, a través de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), deberá intensificar la fiscalización del D.S. 100/1990, modificado por el D.S. (E) 584/2006, ambos de dicho Ministerio, el cual establece la prohibición de realizar quemas agrícolas en toda la Región Metropolitana.

d) Fiscalización del cumplimiento del D.S. 18/2001 del Ministerio de Transportes.

Durante el periodo de gestión de episodios, comprendido entre el 1 de abril y el 31 de agosto de cada año, el Ministerio de Transportes deberá intensificar la fiscalización del D.S. 18/2001 del Ministerio de Transportes y sus modificaciones, el cual establece la prohibición de circulación de vehículos de carga según antigüedad al interior del Anillo Américo Vespucio.

MEDIDAS PARA EPISODIOS CRITICOS DE ALERTA AMBIENTAL

Artículo 79.- En situaciones de Alerta o Nivel 1, previsto en el D.S. N° 59 de 1998 y sus modificaciones, del MINSEGPRES, regirán las siguientes medidas:

a) Suspensión de Clases de Educación Física y Actividades Deportivas.

El Ministerio de Educación podrá suspender las clases de educación física y actividades deportivas para la totalidad de la comunidad escolar, sin que ello implique pérdida de la subvención escolar.

b) Intensificación de la Fiscalización.

Los organismos competentes incrementarán en un 50% las actividades de fiscalización que habitualmente realizan durante el Periodo de Gestión de Episodios Críticos.

c) Reforzamiento del Programa de Aspirado y Lavado de Calles.

El Gobierno Regional Metropolitano reforzará el Programa de Lavado y Aspirado de

Calles establecido en el numeral 5 letra b) del artículo 65 del presente decreto. Especialmente, en aquellas comunas donde se prevé un empeoramiento de la calidad del aire.

d) Prohibición de Funcionamiento de todo tipo de artefactos de calefacción residencial que operen con leña o biomasa.

No podrán funcionar los artefactos de calefacción residencial que utilicen combustibles sólidos, tales como leña, biomasa u otros. Esta medida será fiscalizada por la Autoridad Sanitaria y se aplicará en toda la Región Metropolitana.

MEDIDAS PARA EPISODIOS CRITICOS DE PRE EMERGENCIA AMBIENTAL

Artículo 80.- Las siguientes son las medidas que rigen en situaciones de Pre emergencia o Nivel 2, previsto en el D.S. N° 59 de 1998 y sus modificaciones, del MINSEGPRES:

a) Restricción vehicular adicional durante Pre-emergencia Ambiental.

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, en ejercicio de sus atribuciones, dispondrá las medidas de restricción vehicular, que se describen a continuación:

Tabla N°2:
Restricción Vehicular durante Pre-emergencia Ambiental

| Tipo de Vehículo | Número de dígitos totales por día de lunes a viernes (ambos días inclusive) | Número de dígitos totales por día Sábado, Domingo y festivos |
|--|---|--|
| Automóviles, station wagons y similares, motocicletas y similares, taxis, cualquiera sea la modalidad de servicio, SIN SELLO VERDE | 6 | 6 |
| Buses de transporte privado de personas, buses interurbanos y rurales, SIN SELLO VERDE | 6 | 6 |
| Transporte de carga, SIN SELLO VERDE | 6 | 4 |
| Transporte escolar, SIN SELLO VERDE | 6 | 5 |
| Automóviles, station wagons y similares, motocicletas y similares, taxis, cualquiera sea la modalidad de servicio, CON SELLO VERDE | 4 | 4 |
| Vehículos de transporte privado remunerado de pasajeros, buses interurbanos y rurales, CON SELLO VERDE | 4 | 4 |
| Transporte de carga, CON SELLO VERDE | 4 | 4 |
| Transporte escolar, CON SELLO VERDE | 4 | 4 |

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de la Secretaría Regional Ministerial de Transportes y Telecomunicaciones de la Región Metropolitana, deberá definir las fechas, horarios, zonas, perímetros especiales y excepciones a la aplicación de esta medida.

b) Paralización de Fuentes Fijas (puntuales y grupales)

La Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana dispondrá la paralización de todas las fuentes Puntuales y Grupales, que no acrediten a través de mediciones isocinéticas anuales, que sus concentraciones de material particulado, medidas según el método CH-5 y corregidas por factor de exceso de aire establecido en el D.S. N°322 de 1991, del Ministerio de Salud, son inferiores a 32 mg/Nm³.

Excepcionalmente y por motivos fundados, la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana podrá autorizar como método alternativo de medición para la acreditación de las emisiones exigidas en el párrafo anterior, el descrito en el artículo 29 del presente decreto, u otro establecido en las normas de emisión vigentes.

Asimismo, la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana dispondrá la paralización de aquellos Mayores Emisores de Material Particulado que, al 1° de mayo de 2007, no acrediten el cumplimiento de las metas individuales de reducción de emisiones de material particulado, conforme a lo establecido en el artículo 49 del presente decreto y al procedimiento establecido por las resoluciones N° 51.916 de 20 de diciembre de 2006, y N° 4.729, de 6 de febrero de 2007, ambas de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana. En el mismo sentido, deberán paralizar aquellas fuentes nuevas categorizadas como procesos, que no hayan acreditado el cumplimiento de sus compensaciones ante la Autoridad Sanitaria, según lo dispuesto por el artículo 50 del presente decreto y al procedimiento establecido por las resoluciones N° 51.916 y N° 4.729, ambas de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana.

c) Suspensión de Clases de Educación Física y Actividades Deportivas.

El Ministerio de Educación podrá suspender las clases de educación física y actividades deportivas para la totalidad de la comunidad escolar, sin que ello implique pérdida de la subvención escolar.

d) Reforzamiento del Programa de Aspirado y Lavado de Calles.

El Gobierno Regional Metropolitano reforzará el Programa de Lavado y Aspirado de Calles, establecido en el numeral 5 letra b) del artículo 65 del presente decreto, especialmente, en aquellas comunas donde se prevé un empeoramiento de la calidad del aire.

e) Intensificación de la Fiscalización.

Los organismos competentes incrementarán en un 100% las actividades de fiscalización que habitualmente realizan durante el periodo de gestión de episodios críticos.

- o) **Prohibición de Funcionamiento de todo tipo de artefactos de calefacción residencial que operen con leña o biomasa.**
No podrán funcionar los artefactos de calefacción residencial que utilicen combustibles sólidos, tales como leña, biomasa u otros. Esta medida será fiscalizada por la Autoridad Sanitaria y se aplicará en toda la Región Metropolitana.

MEDIDAS PARA EPISODIOS CRITICOS DE EMERGENCIA AMBIENTAL

Artículo 81.- Las siguientes son las medidas que rigen en situaciones de Emergencia o Nivel 3, previsto en el D.S. N° 59 de 1998 y sus modificaciones, del MINSEGPRES:

- a) **Restricción vehicular adicional durante Emergencia Ambiental.**
El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, en ejercicio de sus atribuciones, dispondrá las medidas de restricción vehicular, que se describen a continuación:

**Tabla N°3:
Restricción Vehicular durante Emergencia Ambiental**

| Tipo de Vehículo | Número de dígitos totales por día de lunes a viernes (ambos días inclusive) | Número de dígitos totales por día Sábado, Domingo festivos |
|--|---|--|
| Automóviles, station wagons y similares, motocicletas y similares, taxis, cualquiera sea la modalidad de servicio, SIN SELLO VERDE | 8 | 8 |
| Buses de transporte privado de personas, buses interurbanos y rurales, SIN SELLO VERDE | 8 | 8 |
| Transporte de carga, SIN SELLO VERDE | 8 | 6 |
| Transporte escolar, SIN SELLO VERDE | 8 | 6 |
| Automóviles, station wagons y similares, motocicletas y similares, taxis, cualquiera sea la modalidad de servicio, CON SELLO VERDE | 6 | 6 |
| Buses de transporte privado de personas, buses interurbanos y rurales, CON SELLO VERDE | 6 | 6 |
| Transporte de carga, CON SELLO VERDE | 6 | 6 |
| Transporte escolar, CON SELLO VERDE | 6 | 6 |

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de la Secretaría Regional Ministerial de Transportes y Telecomunicaciones de la Región Metropolitana, deberá definir las fechas, horarios, zonas, perímetros especiales y excepciones a la aplicación de esta medida.

- b) **Paralización de Fuentes Fijas (puntuales y grupales).**
La Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana, dispondrá la paralización de todas las fuentes Puntuales y Grupales, que no acrediten mediante mediciones isocinéticas anuales, que sus concentraciones de Material Particulado, medidas según el método CH-5 y corregidas por factor de exceso de aire establecido en el D.S. N°322 de 1991, del Ministerio de Salud, son inferiores a 28 mg/Nm³.
Excepcionalmente y por motivos fundados, la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana podrá autorizar como método alternativo de medición para la acreditación de las emisiones exigidas en el párrafo anterior, el descrito en el artículo 29 del presente decreto, u otro establecido en las normas de emisión vigentes.
Asimismo, la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana, dispondrá la paralización de aquellos Mayores Emisores de Material Particulado que, al 1° de mayo de 2007, no acrediten el cumplimiento de las metas individuales de reducción de emisiones de material particulado, conforme a lo establecido en el artículo 49 del presente decreto y al Procedimiento establecido por las resoluciones N° 51.916 de 20 de diciembre de 2006, y N° 4.729, de 6 de febrero de 2007, ambas de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana. En el mismo sentido, deberán paralizar aquellas fuentes nuevas categorizadas como procesos, que no hayan acreditado el cumplimiento de sus compensaciones ante la Autoridad Sanitaria, según lo dispuesto por el artículo 50 del presente decreto y al Procedimiento establecido por las resoluciones N° 51.916 y N° 4.729, ambas de la Secretaría Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana.
- c) **Suspensión de Clases.**
El Ministerio de Educación podrá suspender las clases de educación física y actividades deportivas para la totalidad de la comunidad escolar, sin que ello implique pérdida de la subvención escolar.
- d) **Reforzamiento del Programa de Aspirado y Lavado de Calles.**
El Gobierno Regional Metropolitana, coordinará el reforzamiento del programa de control de levantamiento de polvo, establecido en el PPD.A. Especialmente, en aquellas comunas donde se prevé un empeoramiento de la Calidad del Aire.
- e) **Intensificación de la Fiscalización.**
Los organismos competentes incrementarán en un 150% la fiscalización que habitualmente realizan durante el periodo de gestión de episodios críticos.
- f) **Prohibición de Funcionamiento de todo tipo de artefactos de calefacción residencial que operen con leña o biomasa.**
No podrán funcionar los artefactos de calefacción residencial que utilicen combustibles sólidos, tales como leña, biomasa u otros. Esta medida será fiscalizada por la Autoridad Sanitaria y se aplicará en toda la Región Metropolitana.

PROCEDIMIENTO PARA LA DECLARACION DE EPISODIOS CRITICOS

Artículo 82.- El procedimiento para la declaración de episodios críticos (Alerta, Preemergencia y Emergencia), será el siguiente:

- a) El Director Regional de la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago, informará diariamente al Intendente Regional, en su calidad de Presidente de la COREMA RM, acerca del pronóstico de la calidad del aire y la evolución de las condiciones de ventilación de la cuenca, así como el nivel de episodio crítico que corresponda.
- b) El Intendente, declarará la condición de episodio crítico cuando corresponda, a través de una resolución, que será comunicada a los Servicios competentes. Asimismo, el Intendente hará pública las medidas adoptadas durante las situaciones de episodios críticos, a través del Plan Comunicacional diseñado para este fin.
- c) En el caso previsto en el artículo 5 letra a) del D.S. 59/1998, de MINSEGPRES, relativo a la superación de los niveles que definen situaciones de emergencia, que no hubieren sido detectados por el Sistema de Pronóstico corresponderá al Intendente informar oportunamente tal situación a la ciudadanía.
- d) En el caso previsto en el artículo 5 letra b) del D.S. 59/1998, de MINSEGPRES, que contempla la posibilidad de un cambio en las condiciones meteorológicas, posterior a la hora de comunicación del pronóstico, que asegure una mejoría tal en las condiciones de calidad del aire que invalide los resultados entregados por la metodología de pronóstico, respecto a la superación de alguno de los niveles que definen situaciones de emergencia, el Intendente podrá dejar sin efecto la declaración de episodio crítico o adoptar las medidas correspondientes a los niveles menos estrictos, cumpliendo con las mismas formalidades a que está sujeta la declaración de estas situaciones.

Artículo 1° transitorio.- El presente decreto entrará en vigencia el día de su publicación en el Diario Oficial, a excepción de las disposiciones contenidas en los nuevos artículos 78 letra b), 80 letra a) y 81 letra a) que se incorporan al decreto N° 58 de 2003, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, las que regirán a contar del 1° de enero de 2008.

En el tiempo que medie entre la fecha de publicación del presente decreto y la vigencia de las disposiciones mencionadas en el inciso anterior, continuarán aplicándose los artículos 78 N° 1, 80 letra a), 81 N° 1 y 82 N° 1.

Anótese, tómesese razón, comuníquese, publíquese y archívese. - MICHELLE BACHELET JERÍA, Presidenta de la República. - Paulina Veloso Valenzuela, Ministra Secretaría General de la Presidencia. - Yasna Provoste Campillay, Ministra de Educación. - Alvaro Rojas Marín, Ministro de Agricultura. - María Soledad Barria Iroume, Ministra de Salud. - Sergio Espejo Yaksic, Ministro de Transportes y Telecomunicaciones.

Lo que transcribo a Ud. para su conocimiento. - Saluda atentamente a Ud., Edgardo Riveros Marín, Subsecretario General de la Presidencia.

OTRAS ENTIDADES

Banco Central de Chile

TIPOS DE CAMBIO Y PARIDADES DE MONEDAS EXTRANJERAS PARA EFECTOS DEL NUMERO 6 DEL CAPITULO I DEL COMPENDIO DE NORMAS DE CAMBIOS INTERNACIONALES Y CAPITULO II.B.3. DEL COMPENDIO DE NORMAS FINANCIERAS AL 24 DE ABRIL DE 2007

| Tipo de Cambio \$ (N°6 del C.N.C.I.) | Paridad Respecto US\$ |
|--------------------------------------|-----------------------|
| DOLAR EE.UU. * | 528,30 |
| DOLAR CANADA | 470,77 |
| DOLAR AUSTRALIA | 439,66 |
| DOLAR NEOZELANDES | 393,58 |
| LIBRA ESTERLINA | 1057,02 |
| YEN JAPONES | 4,45 |
| FRANCO SUIZO | 436,76 |
| CORONA DANESA | 96,23 |
| CORONA NORUEGA | 88,48 |
| CORONA SUECA | 78,03 |
| YUAN | 68,37 |
| EURO | 716,92 |
| DEG | 804,87 |

* Tipo de cambio que rige para efectos del Capítulo II.B.3. Sistemas de reajustabilidad autorizados por el Banco Central de Chile (Acuerdo N° 05-07-900105) del Compendio de Normas Financieras.

Santiago, 23 de abril de 2007. - Miguel Angel Naucrur Gazali, Ministro de Fe.

TIPO DE CAMBIO PARA EFECTOS DEL NUMERO 7 DEL CAPITULO I DEL COMPENDIO DE NORMAS DE CAMBIOS INTERNACIONALES

El tipo de cambio "dólar acuerdo" (a que se refiere el inciso primero del N° 7 del Capítulo I del Compendio de Normas de Cambios Internacionales), fue de \$599,73 por dólar, moneda de los Estados Unidos de América, para el día 23 de abril de 2007.

Santiago, 23 de abril de 2007. - Miguel Angel Naucrur Gazali, Ministro de Fe.