



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE
CALIDAD DEL AIRE DE LA REGIÓN
METROPOLITANA, EN BASE A INFORMACIÓN DE
NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO

MACARENA ANDREA CÁCERES DUPRÉ

PROFESOR GUÍA:

DR. PEDRO PABLO OYOLA TAPIA

TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO

SANTIAGO - CHILE

2010

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE
CALIDAD DEL AIRE DE LA REGIÓN
METROPOLITANA, EN BASE A INFORMACIÓN DE
NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO**

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento
parcial de los requerimientos exigidos para optar al título profesional de Ingeniero

Físico

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO - CHILE

2010

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE
CALIDAD DEL AIRE DE LA REGIÓN
METROPOLITANA, EN BASE A INFORMACIÓN DE
NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO**

MACARENA ANDREA CÁCERES DUPRÉ

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

Dr. Ernesto Gramsch Labra _____

Dr. Patricio Pérez Jara _____

Dra. Yolanda Vargas _____

Ing. Jorge Cáceres _____

Dr. Pedro Oyola Tapia

Profesor Guía

MSC. Bernardo Carrasco

Director del Departamento de Física

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de titulación, en particular a los Directores del Centro Premio Nobel Mario Molina Chile (CMMCh), Srs. Jorge Cceres y Gianni López, y especialmente a mi profesor guía Dr. Pedro Oyola, por entregarme el financiamiento y apoyo que permitieron desarrollar este trabajo. Se agradece también la disposición del Sr. Felipe Reyes por su paciencia y dedicación.

Por otra parte, agradecer al Dr. Ernesto Gramsch, por patrocinar este trabajo y por haber contribuido en parte de mi formación profesional.

Se agradece a la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CONAMA RM), porque este trabajo de tesis está enmarcado en el proyecto "Mejoramiento de las Herramientas Técnicas para el Seguimiento de la Evolución de la Calidad del Aire en la Región Metropolitana", desarrollado por CMMCh.

Se agradece también al personal del Centro Nacional del Medio Ambiente (CEN-MA) por la entrega de información valiosa para el desarrollo de este trabajo, en especial al Jefe de la Unidad de Análisis Atmosférico y Calidad de Aire, Sr. Manuel Merino.

Finalmente, doy las gracias a todas las personas que me acompañaron en este proceso, a mi familia y amigos.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	IV
Resumen	XVI
1. Introducción	1
1.1. Justificación del trabajo realizado	1
1.2. Alcances y limitaciones	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Metodología de trabajo	6
1.5. Descripción de los capítulos siguientes	8
2. Contaminación atmosférica por Material Particulado	10
2.1. Origen del Material Particulado	10
2.2. Efectos en salud del Material Particulado respirable (MP10)	14
3. Condiciones que favorecen los altos niveles de MP10 en la Región Metropolitana	17
3.1. Condiciones meteorológicas	18
3.1.1. Inversión térmica de subsidencia	20
3.1.2. Inversión térmica radiativa	21

3.1.3.	Vaguada costera	22
3.1.4.	Dorsal en altura	22
3.1.5.	Condiciones Tipo A	22
3.1.6.	Condiciones Tipo BPF	24
3.1.7.	Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)	25
3.2.	Emisiones en la Región Metropolitana	28
4.	Monitoreo y requerimientos de un sistema de pronóstico de calidad del aire para la Región Metropolitana	33
4.1.	Red MACAM III	33
4.2.	Normativa ambiental vigente para MP10 (Decreto Supremo 59/1998)	38
4.2.1.	Valores que definen situaciones de emergencia	38
4.2.2.	Requerimientos para la aplicación de un modelo de pronóstico de MP10	42
5.	Aplicación del Modelo Cassmassi a las tres nuevas estaciones de la Red MACAM III	47
5.1.	Descripción del Modelo Cassmassi	47
5.2.	Análisis de datos de calidad del aire para MP10	49
5.2.1.	Estadística descriptiva de las series de tiempo de concentra- ciones de 24 horas de MP10	50
5.2.2.	Análisis de correlación entre las concentraciones de MP10 de cada estación de monitoreo	53
5.3.	Desarrollo del modelo	54
5.3.1.	Modelo CONAMA98 para la caracterización de las emisiones por día de la semana	56

5.3.2. Análisis de cambio de emisiones por día de la semana, año 2009	59
5.3.3. Resumen de variables predictoras utilizadas en el análisis de regresión lineal múltiple	61
5.4. Metodología de evaluación de los algoritmos	65
6. Resultados obtenidos de la aplicación del Modelo Cassmassi a las nuevas estaciones de la Red MACAM III	71
6.1. Resultados de la aplicación de regresión lineal múltiple a los paquetes de variables, año 2009	72
6.2. Resultados de la aplicación y evaluación de los modelos para los años 2009 y 2010	74
6.3. Resumen de ecuaciones del modelo Cassmassi año 2010	83
6.3.1. Análisis de umbral	84
6.4. Comparación de los resultados obtenidos por los modelos de pronósti- co oficial y desarrollado el año 2010	85
7. Conclusiones Generales	89
Referencias	91
A. Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles para los años 2005, 2006 y 2007	98
B. Series de tiempo de los valores diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 de las estaciones de la Red MACAM III, periodo crítico año 2009	100
C. Valores diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 de las esta-	

ciones de la Red MACAM III, periodo crítico año 2009	105
D. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada para los años 2009 y 2010	110
E. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para los años 2009 y 2010	117

Índice de tablas

2.1. Comparación de normas y recomendaciones internacionales para las máximas concentraciones de 24 horas y anuales de MP10	15
3.1. Efecto de las configuraciones meteorológicas A y BPF para el periodo crítico 2010	21
3.2. Definición de categorías de PMCA	26
3.3. Inventario nacional de fuentes de contaminación atmosférica de fuentes fijas, valores en toneladas por año (Ton/año)	30
3.4. Emisiones totales de fuentes móviles en ruta con modelo de transporte, valores en toneladas por año (Ton/año)	30
3.5. Inventario de emisiones de fuentes fijas del año 2008	31
4.1. Estaciones de la Red MACAM III	37
4.2. Definición de rangos de MP10 que definen el estado de la calidad del aire	38
4.3. Balance de episodios críticos 2006-2010	42
4.4. Tabla de contingencia para días con pronóstico de alerta para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006	46

4.5. Tabla de contingencia para días con observación de alerta para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006	46
4.6. Tabla de contingencia para días con pronóstico y/u observación de preemergencia para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006	46
5.1. Estadística descriptiva de las series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 para las estaciones de monitoreo de la Red MACAM III	51
5.2. Estadística descriptiva de las series de tiempo de los valores diarios de las 10 a.m. de concentraciones de 24 horas de MP10 para las estaciones de monitoreo de la Red MACAM III	51
5.3. Correlación entre las concentraciones horarias de MP10 para las 11 estaciones de monitoreo de la Red MACAM III, 2009-2010	53
5.4. Índice de emisiones CONAMA98	58
5.5. Promedio de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana en cada estación de monitoreo, año 2009	59
5.6. Porcentaje de cambio en las concentraciones en un día ($CP_{24}-1D_{d'ia}$) en cada estación de monitoreo	60
5.7. Promedio de los valores diarios de las 10 a.m. de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana en cada estación de monitoreo, año 2009	60
5.8. Porcentaje de cambio en las concentraciones en un día ($CP_{10}-1D_{d'ia}$) en cada estación de monitoreo	61
5.9. Resumen y definición de las variables utilizadas para desarrollar los algoritmos de pronóstico	62

5.10. Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Puente Alto, 2009	62
5.11. Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Talagante, 2009	63
5.12. Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Quilicura, 2009	63
5.13. Variables predictoras utilizadas para cada modelo.	64
5.14. Matriz de contingencia para la evaluación de los algoritmos de cálculo	70
6.1. Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Puente Alto (Desarrollados con datos de 2009)	72
6.2. Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Talagante (Desarrollados con datos de 2009)	73
6.3. Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Quilicura (Desarrollados con datos de 2009)	74
6.4. Evaluación (Score) modelos Puente Alto 2009 y 2010	76
6.5. Evaluación (Score) modelos Talagante 2009 y 2010	76
6.6. Evaluación (Score) modelos Quilicura 2009 y 2010	77
6.7. Ecuaciones de pronóstico oficiales y desarrolladas para las nuevas esta- ciones de la Red MACAM III	84
6.8. Número de días por estación en que se registraron los mayores valores diarios de concentración máxima de 24 horas de la Red MACAM, período crítico 2010	85
6.9. Comparación modelos Cassmassi y desarrollados para la estación de Quilicura 2010	86

Índice de figuras

1.1. Datos históricos de las concentraciones anuales promedio de MP10 medidos en las estaciones de la Red MACAM entre los años 1997 y 2009, contrastados con la norma Chilena de calidad primaria y la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS)	4
2.1. Composición química del MP10 y fuentes asociadas a su emisión para el año 2005 en la Región Metropolitana	13
3.1. Número de episodios tipo A y BPF ocurridos entre el año 1997 y 2010, contrastados con la ocurrencia de episodios críticos de contaminación atmosférica por MP10	19
3.2. Comparación del PMCA observado y pronosticado con 24 horas de anticipación, periodo crítico 2009 y 2010	27
3.3. Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles de MP10 para los años 2005, 2006 y 2007	30
4.1. Red MACAM III	36
4.2. Definición del ICAP	39

4.3. Serie de tiempo MP10 de un episodio crítico 2010, para ilustrar las diferencias entre concentraciones horarias, concentración de 24 horas, promedio móvil de 24 horas e ICAP.	40
4.4. Número de episodios críticos constatados por la Red MACAM entre los años 1997 y 2010	42
5.1. Concentraciones mensuales promedio de los datos horarios para el año 2009 de las estaciones de la Red MACAM III	52
5.2. Concentraciones horarias promedio para el periodo crítico del año 2009 de las estaciones de la Red MACAM III	55
6.1. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Puente Alto 2009-2010	80
6.2. Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP10 diaria observada y pronosticada para Puente Alto 2009-2010	80
6.3. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2009-2010	81
6.4. Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP10 diaria observada y pronosticada para Talagante	81
6.5. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2009-2010	82
6.6. Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP10 diaria observada y pronosticada para Quilicura	82
A.1. Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles para los años 2005, 2006 y 2007	99

B.1. Series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009	101
B.2. Series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009	102
B.3. Series de tiempo de los valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009	103
B.4. Series de tiempo de los valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009	104
C.1. Valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009	106
C.2. Valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009	107
C.3. Valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009	108
C.4. Valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009	109
D.1. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Puente Alto 2009	111
D.2. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Puente Alto 2010	112
D.3. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2009	113
D.4. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2010	114

D.5. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2009	115
D.6. Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2010	116
E.1. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto	118
E.2. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto	119
E.3. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto	120
E.4. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante	121
E.5. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante	122
E.6. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante	123
E.7. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura	124
E.8. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura	125
E.9. Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura	126

Resumen

Las altas concentraciones de Material Particulado respirable (MP10) observadas históricamente en la Región Metropolitana, generaron la implementación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) en el año 1998. En este plan se estableció la necesidad de contar con un sistema de pronóstico de los valores máximos de concentraciones de 24 horas de MP10 que anticipe los niveles esperados para el día siguiente, con el fin de proteger la salud de la población.

Actualmente el pronóstico se realiza con el modelo Cassmassi basado en algoritmos lineales de cálculo desarrollados mediante la aplicación de técnicas de regresión lineal múltiple a paquetes de variables predictoras relacionadas con concentraciones de MP10 medidas por la Red MACAM III; variables meteorológicas observadas e índices pronosticados; y factores de cambio de emisiones esperados. Cada algoritmo se construye para cada estación.

En el año 2008 se incorporaron 3 estaciones a la Red MACAM III en las comunas de Puente Alto, Talagante y Quilicura que no cuentan con un algoritmo de pronóstico. Por lo anterior, se construirán los 3 algoritmos faltantes utilizando la metodología del modelo Cassmassi. Al finalizar este trabajo, se encontró que sólo el algoritmo de la estación Quilicura genera una mejora en los niveles pronosticados en las categorías de nivel Bueno-Regular. No se observó una mejoría en el pronóstico de Alertas.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación del trabajo realizado

La ciudad de Santiago de Chile presenta desde hace varias décadas serios problemas en el control de la contaminación atmosférica, en especial del Material Particulado respirable de tamaño aerodinámico igual o inferior a $10\mu m$ (MP10). Por esta razón la ciudad fue declarada zona saturada el año 1996 debido a los altos niveles de este contaminante y además por ozono, monóxido de carbono y partículas totales en suspensión, y zona latente por los elevados niveles de dióxido de nitrógeno presentes en el aire [9].

Gracias a la implementación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana (R.M.) el año 1998 [11], la calidad del aire ¹ ha mejorado en los últimos 12 años [31], logrando terminar con el estado de latencia por dióxido de nitrógeno y con la saturación por monóxido de carbono.

¹La calidad del aire está definida por los niveles de concentraciones de contaminantes presentes en la atmósfera, en este sentido la calidad del aire se considera buena o aceptable si las concentraciones cumplen con la normativa vigente y mala si las concentraciones superan los niveles establecidos en la norma.

Aún cuando la condición de saturación por MP10 y ozono se mantiene hasta la actualidad por la superación de las normas de calidad primarias ² que rigen los niveles máximos de las concentraciones de estos contaminantes en la atmósfera [12] y [8] respectivamente.

La norma de calidad primaria para MP10 establece límites de concentraciones máximas de $150\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (microgramos por metro cúbico normal³) como concentración de 24 horas, y de $50\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como concentración anual.

Con el objetivo prevenir la exposición de la población a altos niveles de concentraciones de MP10, el PPDA en su documento oficial, establece un plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación durante el período de empeoramiento de las condiciones de ventilación de la cuenca de Santiago, que se extiende desde el 01 de abril hasta el 31 de agosto de cada año, según la Autoridad Ambiental. Para ello, contempla la aplicación de una serie de medidas preventivas permanentes de control de emisiones de contaminantes, orientadas al control de las actividades o fuentes que originan la contaminación (transporte, industria, comercio, construcción, agricultura y polvo resuspendido) y medidas de mitigación durante episodios críticos (alerta, preemergencia o emergencia).

El plan operacional para la gestión de episodios críticos que la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CONAMA RM) aplica anualmente [13], cuenta con un sistema de pronóstico de calidad del aire (modelo Cassmassi) [20] que entrega diariamente durante el período crítico, el pronóstico del valor máximo de la concentración de 24 horas (promedio móvil) de MP10 esperada para el día

²Las normas de calidad primarias son aquellas que establecen los valores de las concentraciones y períodos máximos y mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población [17].

³En lo que sigue del documento, se utilizará por simplicidad la nomenclatura $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en vez de $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

siguiente expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El pronóstico se informa diariamente a la población a través de los medios de comunicación como Índice de Calidad del Aire por Partículas (ICAP), que corresponde a una transformación lineal de las concentraciones de MP10.

Se debe tener en consideración que el pronóstico de calidad del aire sólo es una herramienta que ayuda a prevenir la exposición de la población a altos niveles de contaminación por MP10, pero no incide en el mejoramiento de la calidad del aire, debido a que las medidas extremas de reducción de emisiones sólo se aplican durante los episodios críticos.

Para la realización del pronóstico se cuenta con un sistema de seguimiento de las condiciones meteorológicas de escala regional y sinóptica[14], y de calidad del aire de la Región Metropolitana a través de la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire (MACAM), que cuenta actualmente con 11 estaciones de monitoreo de la calidad del aire situadas en las comunas de Independencia, La Florida, Las Condes, El Bosque, Cerrillos, Santiago, Pudahuel, Cerro Navia, Puente Alto, Talagante y Quilicura [6], [24].

A pesar de que el PPDA fue revisado y actualizado en dos ocasiones para cumplir con las normas de calidad del aire al año 2010, los niveles anuales han sido superados cada año en la mayoría de las estaciones, en detrimento de la salud de la población y del medio ambiente.

La evolución histórica de los promedios anuales de las concentraciones de MP10 en 7 de las 11 estaciones de la Red MACAM III que cuentan con información continua desde 1997 hasta 2009 [24], se muestra en la Fig. 1.1.

Para la estación de Cerro Navia, sólo se cuenta con los promedios anuales del 2005, 2008 y 2009, con valores de 69, 75 y 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Mientras que para

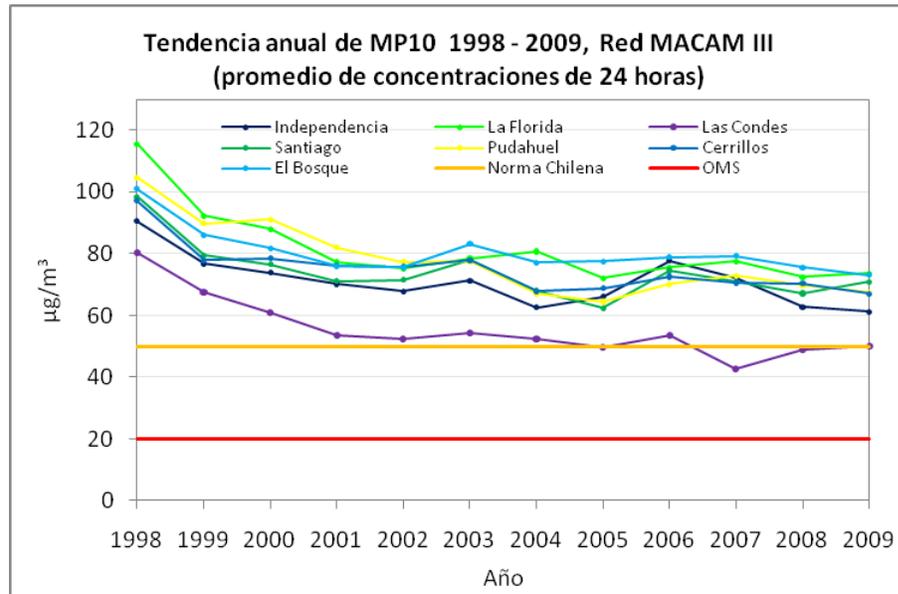


Figura 1.1: Datos históricos de las concentraciones anuales promedio de MP10 medidos en las estaciones de la Red MACAM entre los años 1997 y 2009, contrastados con la norma Chilena de calidad primaria y la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

las estaciones de Talagante, Puente Alto y Quilicura, operativas desde el año 2008, los valores anuales promedio para el 2009 fueron 45, 53 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

1.2. Alcances y limitaciones

Este trabajo ha sido desarrollado en base a la necesidad de actualizar el modelo predictivo oficial de calidad del aire (modelo Cassmassi) utilizado por CONAMA RM, durante el período crítico de episodios de alta contaminación atmosférica.

El modelo Cassmassi no ha sido actualizado oficialmente desde su implementación en el año 2000, aún cuando las emisiones de la región han cambiado a lo largo del tiempo, en base a las medidas adoptadas por la Autoridad Ambiental en los últimos

años. En este sentido, se ha mejorado la calidad de los combustibles disminuyendo significativamente sus niveles de azufre desde 1998, donde se alcanzaban 1.000 ppm (partículas por millón) hasta la actualidad donde alcanzan los 50 ppm. Por otra parte, ha aumentado la fiscalización de las industrias contaminantes, que además han debido incorporar tecnologías de control de emisiones de MP10.

A comienzos de la implementación del modelo Cassmassi en el año 2000, la Red MACAM contaba con 8 estaciones de monitoreo situadas en las comunas de Independencia, La Florida, Las Condes, El Bosque, Cerrillos, Santiago, Pudahuel y Providencia. Sin embargo, el año 2001 se incorporó la estación de Cerro Navia, mientras que se eliminó la estación de Providencia el año 2003. Posteriormente, el año 2008 se incorporaron las últimas 3 estaciones que componen la Red MACAM III, situadas en las comunas de Puente Alto, Talagante y Quilicura, que aún no forman parte del sistema de pronóstico de calidad del aire. En vista de lo anterior, el objetivo de este trabajo es incorporar estas estaciones en el pronóstico diario de los valores máximos de concentraciones de 24 horas de MP10, generando las 3 ecuaciones predictivas faltantes en el modelo. Como limitación de este trabajo se considera la no actualización de las ecuaciones de las 8 estaciones restantes.

1.3. Hipótesis

- Un análisis de correlación entre las concentraciones de MP10 medidas en las 11 estaciones de monitoreo de la Red MACAM III, podría ser de gran utilidad para identificar las variables que mejor se ajustan con el pronóstico de MP10 para las 3 nuevas estaciones.

- Se podría mejorar el pronóstico de la calidad del aire para MP10 en la Región Metropolitana, con la utilización de la ecuación de pronóstico para la estación de

Quilicura, donde se han registrado durante los años 2009 y 2010, altas concentraciones de MP10 durante el período crítico, considerando además que del total de 13 episodios críticos constatados en 2010 (11 alertas y 2 preemergencias) 1 se generó en esta estación (alerta).

- Se espera que las ecuaciones de pronóstico de calidad del aire de las estaciones de Talagante y Puente Alto no generen mejoras en el pronóstico, debido a los bajos niveles de concentraciones de MP10 registradas durante los años 2009 y 2010.

- Al igual que para las ecuaciones oficiales del modelo Cassmassi, la utilización de la variable DIFF (índice de distintas condiciones meteorológicas) en las ecuaciones de las nuevas estaciones, tendrá una ponderación importante, puesto que la meteorología juega un rol trascendental en el comportamiento de las concentraciones de MP10.

1.4. Metodología de trabajo

Para la elaboración de las 3 ecuaciones faltantes para completar el modelo de pronóstico oficial (modelo Cassmassi), se utilizará la metodología desarrollada por Joseph Cassmassi[29]. Para ello, se deberá verificar la disponibilidad de las variables utilizadas originalmente ($MP10AM$, $DIFF$, $TEND$, $EMIS - 1$, $EMIS - 2$, $C10 - 1D$), debido a que no es posible descargar todas las bases de datos desde sitios Web.

Se utilizará información de calidad del aire medida por la Red MACAM III y validada ⁴ por los operadores de esta red (SEREMI de Salud R.M.) para el año

⁴El proceso de validación de la información consiste en la revisión detallada de cada uno de los datos medidos por los instrumentos de una red, extrayendo aquellos que presenten inexactitudes inherentes al proceso, como valores erráticos o inexistentes producidos por cortes de luz, valores correspondientes a calibraciones y no a mediciones, valores no representativos debido a fuentes ocasionales (como por ejemplo un incendio), entre otros. En primera instancia, los datos son validados diariamente por los operadores de red y ratificados por el Ministerio de Salud, organismo encargado de oficializar las bases de datos. Se debe hacer mención que sólo los datos ratificados se pueden utilizar para verificar el cumplimiento de las normas de calidad vigentes, mientras que los datos validados sólo constituyen una referencia (en este caso se trabajó con datos validados, debido a que

2009 y 2010, específicamente las concentraciones horarias de MP10 medidas en las 3 estaciones de monitoreo. Adicionalmente, se utilizarán las bases de datos correspondientes a las otras 8 estaciones de monitoreo, con el objeto de comparar los valores medidos en todas las estaciones, además de verificar el cumplimiento de las normas de calidad primaria para MP10.

Las concentraciones horarias de MP10 serán descargadas desde el sitio Web del SEREMI de Salud R.M. [24] y de la plataforma AIRVIRO [18] instalada en Centro Mario Molina Chile [4]. Posteriormente a la recopilación de la información correcta, se trabajará en el procesamiento estadístico de las bases de datos para cada una de las estaciones.

La variable *DIFF*, derivada la observación del día actual y pronóstico para el día siguiente del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférico (PMCA), se solicitará al Centro Nacional del Medio Ambiente de la Universidad de Chile (CENMA)[3], institución encargada de operar el modelo Cassmassi diariamente.

Para realizar las gráficas que muestran la evolución de las concentraciones horarias, mensuales y anuales del MP10, se considerará lo estipulado en el Decreto Supremo 59/1998 [12] que señala que para la concentración diaria se debe contar con al menos 18 horas, para la concentración mensual se debe considerar el 75 % de los datos del mes y para el año se debe considerar un mínimo de 11 meses. En caso de tener entre 8 y 11 meses de mediciones, para completar los 11 meses, se considerará como valor mensual de cada mes faltante, la concentración mensual más alta medida en los 12 meses anteriores de cada mes faltante. Si hay menos de 8 meses, no se podrá calcular el promedio para esa estación.

Como se conocen las ecuaciones utilizadas para cada una de las 7 estaciones que ya incorporan el modelo de pronóstico, se realizará un análisis de correlación entre el MINSAL demora cerca de 6 meses en ratificar la información) [25]

las bases de datos de MP10 de todas las estaciones de monitoreo, con el objeto de identificar los grupos de estaciones que se comportan temporalmente de forma similar, para determinar con qué estaciones se agrupan las 3 estaciones que no cuentan con su ecuación de pronóstico. Esto se realizará para identificar de forma más simple qué variables podrían generar un buen pronóstico para las nuevas estaciones.

Una vez identificadas las variables que podrían tener mayor peso en la predicción, se construirán las bases de datos para el año 2009 para la construcción de 5 modelos o algoritmos obtenidos con la técnica estadística de regresión lineal múltiple aplicada a cada paquete de variable predictoras. Una vez obtenidas los algoritmos de pronóstico, se aplicarán a las bases de datos de las mismas variables predictoras para el año 2010.

Finalmente, mediante la aplicación de la metodología desarrollada por Joseph Cassmassi [29] se evaluará el desempeño de cada uno de los 5 algoritmos para cada año (Ranking) y se determinará cuál es el que genera un pronóstico más exacto para cada estación de monitoreo.

Todos los cálculos se realizaron con el software Microsoft Excel 2007.

1.5. Descripción de los capítulos siguientes

En el Capítulo 2 se entrega una descripción detallada acerca del origen y composición del Material Particulado respirable (MP10) y sus efectos en la salud de las personas.

En el Capítulo 3 se entrega la información relativa a las situaciones que generan altos niveles de contaminación atmosférica por MP10 en la Región Metropolitana, incluyendo factores geográficos, meteorológicos y de emisiones.

En el Capítulo 4 se presenta información fundamental para el desarrollo del trabajo. En este sentido, se realiza una descripción de la Red MACAM III indicando la

distribución geográfica de sus estaciones de monitoreo de calidad del aire y la forma de medición del MP10; se detallan las exigencias normativas para las concentraciones de MP10 y para el sistema de pronóstico; se indican los sistemas de pronóstico que han sido utilizados a la fecha en la Región Metropolitana. Adicionalmente, se muestran gráficas con información relativa a la ocurrencia histórica de episodios críticos de contaminación.

En el Capítulo 5 se describe el modelo Cassmassi y se aplica su metodología de pronóstico para la realización diaria del pronóstico de concentración máxima de 24 horas MP10 utilizado en la Región Metropolitana a las 3 estaciones de la Red MACAM III que aún no han sido incorporadas: Talagante, Puente Alto y Quilicura. Se muestran tablas con los resultados de los análisis realizados a las bases de datos de MP10.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados de la aplicación del modelo Cassmassi a las 3 estaciones nuevas de la Red MACAM III. Se muestran tablas de contingencia y gráficas de comparaciones de la aplicación del modelo Cassmassi oficial durante el período crítico del año 2010, en contraste con la aplicación del modelo actualizado para las 3 estaciones que no habían sido consideradas anteriormente.

En el Capítulo 7 se muestran las conclusiones generales del trabajo realizado.

Adicionalmente se muestran 5 apéndices (A, B, C, D y E) con las gráficas que dan origen a los datos mostrados en los Capítulos 3, 5 y 6.

Capítulo 2

Contaminación atmosférica por Material Particulado

2.1. Origen del Material Particulado

La contaminación atmosférica se define como *la presencia o acumulación en la atmósfera de uno o más contaminantes, como polvo, gases, olores, nieblas o vapores, en cantidades y duración tales, que puedan causar daño a la salud humana, a sus bienes, a la flora, la fauna y al ambiente en general* [39].

En la actualidad la contaminación atmosférica es una de las problemáticas que representa grandes desafíos para el hombre moderno, en vista del rápido deterioro experimentado por el medio ambiente desde la Revolución Industrial [27].

De particular interés científico es el Material Particulado (MP), como uno de los contaminantes atmosféricos más complejos en cuanto a su composición, sus efectos en la salud de las personas y en el medio ambiente. Es también denominado aerosol (del griego *aero*: aire y *sol*:suelo) atmosférico, debido a que son partículas muy pequeñas (líquidas o sólidas), de variada composición química que se encuentran suspendidas

en la atmósfera, siendo uno de los componentes principales de la tropósfera (0-10 Km. de altura)[35].

Los aerosoles juegan un rol esencial en la formación de las nubes actuando como núcleos de condensación. También son importantes para el balance radiativo del planeta pues contribuyen a aumentar la reflexión y dispersión de la radiación proveniente del Sol [1].

El origen del MP es múltiple, existiendo procesos de tipo físico, químico o biológico, tanto biogénicos (naturales) como antropogénicos (producidos por las diversas actividades humanas). Dentro del origen biogénico se encuentran: aerosoles marinos, erupciones volcánicas, polvo levantado desde el suelo (resuspendido), incendios forestales, virus, bacterias y el polen de las plantas, entre otros. Mientras que dentro del origen antropogénico del MP se encuentran: combustión de productos derivados del petróleo (calderas, transporte, centrales termoeléctricas, etc.), quemas en campos agrícolas, quema de leña, procesos desarrollados en faenas mineras y diversos procesos industriales [35].

De acuerdo al mecanismo de incorporación de los aerosoles a la atmósfera, se clasifican en primarios a aquellos emitidos directamente desde su fuente de origen. Su estructura es relativamente simple, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), carbono elemental (CE), carbono orgánico (CO) y dióxido de azufre (SO_2), provenientes de procesos de combustión; ácido sulfhídrico, amoníaco, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, provenientes de procesos industriales. Además, ambos tipos de procesos pueden emitir moléculas más complejas como hidrocarburos aromáticos polinucleares, metales pesados (plomo, arsénico, berilio, cadmio, mercurio) y dioxinas, entre otros. Mientras que los aerosoles secundarios son formados en la atmósfera a través de diversas reacciones químicas generadas por la presencia de

oxígeno, radiación solar y vapor de agua, entre otros, tales como ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2). Los contaminantes primarios que reaccionan en la atmósfera se denominan precursores de los contaminantes secundarios[27].

La clasificación del MP varía en cuanto a su tamaño (desde $0,001\mu m$ hasta $100\mu m$), composición química (puede ser rico en metales pesados, sulfatos, carbono elemental y orgánico dependiendo del lugar de origen como se muestra en [37]) y distribución espacio-temporal (tiempo y lugar de permanencia en la atmósfera), pudiendo generar efectos negativos en la salud humana, flora y fauna cuando su diámetro aerodinámico ¹ es igual o inferior a los $10\mu m$ denominándose MP10.

Dentro del MP10 se encuentra el $MP2,5$ cuyo diámetro aerodinámico es igual o inferior a $2,5\mu m$. Por lo general, los componentes del MP10 son de origen primario, mientras que los del MP2,5 son de origen secundario y por lo tanto, más dañinos para la salud humana.

Los análisis de composición química y determinación de fuentes de origen del material particulado, pese a su importancia, no se realizan con frecuencia, en vista de su alto costo y complejidad. Un claro ejemplo de ello, se observa en el documento vigente del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) de la Región Metropolitana, que considera como información oficial, la obtenida para el año 2005 a través de un estudio realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile[36].

En base a ese estudio, la composición química del material particulado MP10 se muestra en la Fig. 2.1(a), donde se observa que más del 43% de su composición

¹Como las partículas tienen generalmente formas irregulares, por simplicidad, se asume que éstas poseen un diámetro aerodinámico, que es el diámetro de una partícula esférica de densidad equivalente a la densidad de la partícula real que se mide con algún instrumento determinado, y que presenta la misma velocidad de sedimentación (velocidad terminal de la partícula debido a la fuerza gravitacional en el aire, en condiciones estándar de temperatura, presión y humedad relativa) que la partícula real.

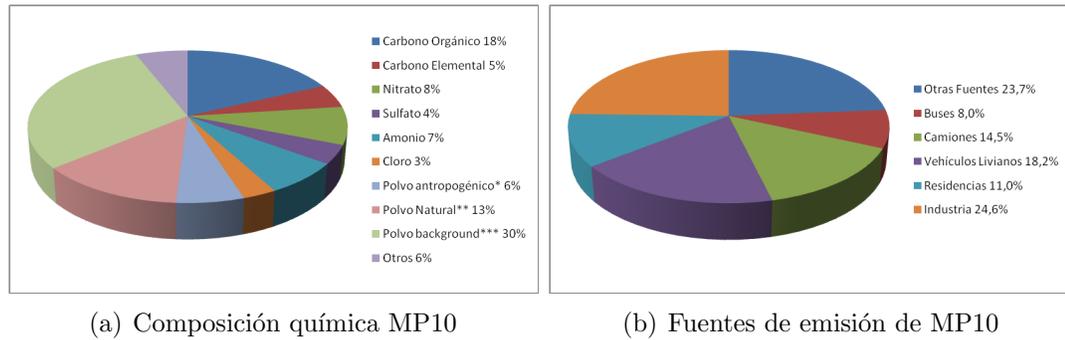


Figura 2.1: Composición química del MP10 y fuentes asociadas a su emisión para el año 2005 en la Región Metropolitana

es de origen natural o biogénico, mientras que el porcentaje restante corresponde a aerosoles secundarios principalmente.

En la Fig.2.1(b) se muestran las principales fuentes de emisión de MP10 para el año 2005 en la Región Metropolitana [36], donde se observa que más del 40% de las emisiones provienen del transporte público y privado, seguido por el aporte industrial y de las emisiones residenciales. Las otras fuentes que indica (23,7%) se refiere a fuentes difíciles de catastrar mediante los inventarios de emisiones que genera la Autoridad Ambiental [19], ellos son: quemas agrícolas, maquinaria fuera de ruta, crianza de animales entre otras.

No existen estudios más recientes según se indica en el documento del PPDA de CONAMA vigente al año 2010, para la composición química y aporte de fuentes al MP10.

Los promedios de las concentraciones diarias de MP10 son más altas durante los meses de invierno y más bajas en verano como se aprecia en la pág. 5.1 y se muestra en [34], [31]. Durante períodos de episodios críticos en invierno los aumentos en los niveles de MP10 ocurren generalmente por la asociación con el incremento de otros agentes contaminantes relacionados al tráfico vehicular como óxidos de nitrógeno, y

durante el verano, debido a la oxidación fotoquímica del dióxido de azufre al sulfato y de los óxidos de nitrógeno al nitrato.

2.2. Efectos en salud del Material Particulado respirable (MP10)

El efecto del material particulado en la salud de las personas depende básicamente de su composición física (tamaño aerodinámico), química (toxicidad) y de su concentración (nivel y tiempo de exposición), generando un daño significativo en la salud humana que se manifiesta como muertes prematuras, especialmente de causa cardiovascular y respiratoria; hospitalizaciones por patología cardiovascular; consultas en servicios de urgencia; días de ausentismo laboral y escolar; exacerbaciones de cuadros asmáticos y aumento de síntomas como la tos, entre otros. [43].

El tamaño del material particulado es determinante en cuanto al grado de penetración y permanencia en el sistema respiratorio. Las partículas, cuyo diámetro es superior a $5 \mu m$ (material particulado grueso), se depositan en las vías aéreas superiores (boca y nariz), en la tráquea y en los bronquios. Mientras que aquellas cuyo diámetro es inferior (material particulado fino) tienen mayor probabilidad de depositarse en los bronquiolos y alvéolos pulmonares a medida que su tamaño disminuye. Por otra parte, la capacidad del material particulado de absorber y adsorber otras sustancias en su superficie, genera un efecto sinérgico que incrementa su agresividad [7].

Los efectos negativos generados por los metales pesados presentes en el material particulado respirable, pueden generar efectos agudos² y crónicos³ en la salud de las

²Los efectos agudos son los efectos nocivos de los contaminantes en un corto plazo de exposición

³Los efectos crónicos son aquellos producidos por la acción de concentraciones variables de

personas. Por ejemplo, la inhalación de material particulado rico en plomo (forma más usual de exposición) puede generar dolor de cabeza, efectos graves que pueden llegar a la muerte. Mientras que la exposición al MP rico en arsénico puede generar irritación en los pulmones, distintos tipos de cáncer, infertilidad, daños en el corazón y cerebro, entre otros[25].

Tabla 2.1: Comparación de normas y recomendaciones internacionales para las máximas concentraciones de 24 horas y anuales de MP10

Periodo	Norma de calidad chilena $\mu g/m^3$	OMS $\mu g/m^3$	EE.UU. $\mu g/m^3$	UE $\mu g/m^3$
Media 24 horas	150	50	150	50
Media anual	50	20	derogada	40

En la Tabla 2.1 se muestra la comparación entre los valores de concentración máxima de 24 horas y anual establecidos en la norma chilena de calidad primaria para MP10 en comparación con los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y establecidos por Estados Unidos (EE.UU.) y la Unión Europea (UE) [31].

La existencia de una relación entre concentración de MP10 y los efectos agudos sobre la salud de las personas con mortalidad⁴ y morbilidad⁵ por causas respiratorias y cardiovasculares confirman una relación positiva y significativa entre estas variables, indicando además, que el aumento de riesgo de mortalidad ante incrementos de MP10 de $100 \mu g/m^3$ sería del orden de 3 a 15 %, dependiendo de la ciudad

contaminantes durante períodos prolongados de exposición. Se manifiestan por la gravedad de enfermedades como asma bronquial, bronquitis obstructiva crónica, enfisema pulmonar y cáncer [12]

⁴La tasa de mortalidad es el indicador demográfico que señala el número de defunciones de una población por cada 1.000 habitantes, durante un período determinado generalmente un año.

⁵Morbilidad es la cantidad de personas o individuos considerados enfermos o víctimas de una enfermedad en un espacio y tiempo determinados. La morbilidad es, entonces, un dato estadístico de altísima importancia para poder comprender la evolución y avance o retroceso de una enfermedad, así también como las razones de su surgimiento y las posibles soluciones.

estudiada (composición del MP10). En Chile, este efecto ha sido cuantificado sólo en la ciudad de Santiago, encontrándose excesos de riesgos de mortalidad entre 6 y 8% [42].

Por las razones expuestas anteriormente, es fundamental disponer de un sistema de pronóstico de calidad del aire, debido a la importancia de anticipar las medidas de control y de resguardo a la población frente a la ocurrencia de situaciones críticas.

Capítulo 3

Condiciones que favorecen los altos niveles de MP10 en la Región Metropolitana

Existen múltiples factores que inciden directamente en la contaminación atmosférica de un lugar determinado, entre ellos se encuentran las variables meteorológicas de escala regional y sinóptica (viento, temperatura, precipitaciones, humedad, radiación solar, altura de la capa de mezcla), la topografía (configuración de valle, costa, etc.) y los niveles de emisiones de contaminantes generadas por industrias, hogares y el transporte.

A continuación se definen los factores más relevantes que ayudan a comprender los altos índices de contaminación registrados en la Región Metropolitana.

La geografía y las condiciones meteorológicas de la cuenca de Santiago son, en general, desfavorables a la dispersión de contaminantes atmosféricos, tanto horizontal como verticalmente, especialmente en los meses de otoño e invierno (desde abril hasta agosto).

La Región Metropolitana, también llamada cuenca de Santiago (33,5 S y 70,8 W) se sitúa en el borde occidental de Sudamérica subtropical, al oeste de la Cordillera de los Andes (4.500 msnm aprox.) y a aproximadamente 100 Km del Océano Pacífico, separada por la Cordillera de la Costa (cerro de mayor altitud sobrepasa los 1.200 msnm) que presenta una interrupción de 40 Km aprox. de ancho por el drenado del Río Maipo, lo que permite el ingreso de masas de aire desde el mar. Adicionalmente, la cuenca es confinada hacia el norte y hacia el sur por cadenas montañosas transversales de alturas similares a las de la Cordillera de la Costa. El área urbana de la región está entre los 450 y 700 msnm [15].

3.1. Condiciones meteorológicas

La Región Metropolitana se encuentra durante gran parte de año bajo la influencia del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental¹, lo que genera que exista una persistente inversión térmica de subsidencia y un clima semiárido, con precipitaciones anuales cercanas a los 300 mm concentradas en los meses de invierno [35].

Como la emisión de contaminantes es relativamente uniforme en la escala interdiaria, la variabilidad temporal en la concentración de contaminantes es la resultante de cambios en la ventilación y estabilidad de la tropósfera baja sobre la cuenca de Santiago (escala local), factores que a su vez son modulados por fenómenos meteorológicos de mayor escala sobre Chile central (escala sinóptica de longitud horizontal del orden de los 1.000 Km) [35].

Una atmósfera estable es aquella cuyas condiciones no favorecen el desarrollo de corrientes verticales, no permitiendo la dispersión de los contaminantes y, por lo tanto, genera un aumento local de las concentraciones de MP10. Normalmente la

¹zona estable de altas presiones

temperatura en la tropósfera disminuye con la altura. Sin embargo, se pueden dar condiciones meteorológicas que invierten esta situación, generando que la temperatura en la tropósfera aumente con la altura, generando una inversión térmica cuyo origen es diverso [33].

Las condiciones sinópticas asociadas a episodios críticos (alerta, preemergencia y emergencia) se definen como A y BPF [46]. Los episodios Tipo A dan cuenta de alrededor de un 70 % del total de episodios, y los BPF del 30 % restante, presentándose además episodios mixtos que se inician normalmente como Tipo A y después de un corto período de relajación o remisión intermedios, se presenta una condición BPF [3].

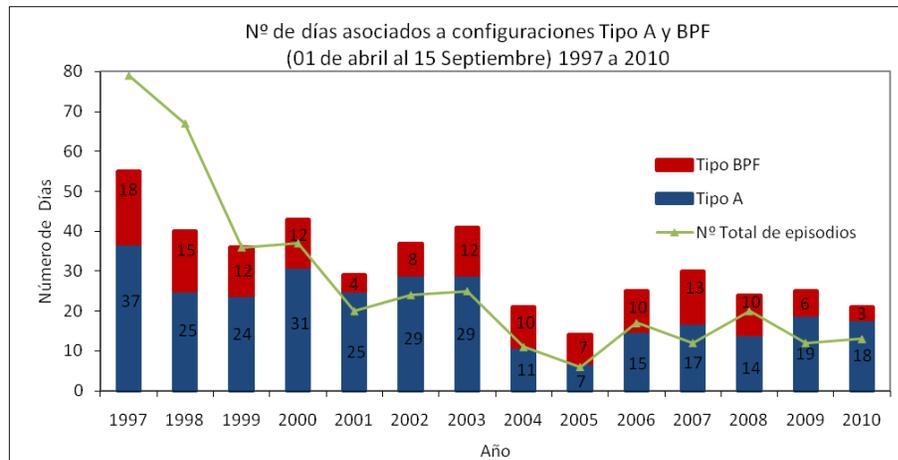


Figura 3.1: Número de episodios tipo A y BPF ocurridos entre el año 1997 y 2010, contrastados con la ocurrencia de episodios críticos de contaminación atmosférica por MP10

En la Fig.3.1 se muestra la ocurrencia de configuraciones meteorológicas A y BPF por año, ocurridas desde 1997 al 2010 en la Región Metropolitana. Se observa que

para los años 1997 y 1998 (antes de la implementación del PPDA) el número de episodios críticos no está relacionado únicamente con la ocurrencia de condiciones Tipo A y BPF, seguramente los episodios en esa época tenían mayor relación con el incremento en las emisiones que con las condiciones meteorológicas. Mientras que desde el 1999 en adelante se observa además de una disminución significativa en el número de episodios (86 % entre 1998 y 1999), que éstos están relacionados con la ocurrencia de condiciones A y BPF.

En la Tabla 3.1 se muestra el marcado efecto de las configuraciones meteorológicas de tipo A o BPF sobre las concentraciones de MP10, observando que cada episodio crítico de contaminación (alertas y preemergencias) ocurrido durante el año 2010 estuvo relacionado con una condición meteorológica desfavorable para la dispersión de contaminantes.

3.1.1. Inversión térmica de subsidencia

Se forma en la vecindad de un área de altas presiones, justamente donde se encuentra la Región Metropolitana. El aire frío de las capas altas comienza a descender para ocupar el sitio del aire superficial que tiende a desplazarse a la zona de baja presión. El aire que va descendiendo se comprime debido al aumento de la presión, calentándose y atrapando debajo aire más frío, a la vez que se va esparciendo horizontalmente. Puede permanecer como una capa templada a alturas de varios cientos de metros de superficie. Su espesor, al principio de varios hectómetros, se va reduciendo al seguir comprimiéndose hasta grosores de 100-200 m, aumentando más la diferencia de temperatura y disminuyendo la humedad relativa[33].

Tabla 3.1: Efecto de las configuraciones meteorológicas A y BPF para el periodo crítico 2010

Fecha	Configuración Meteorológica	Nivel	$[MP10]_{max,24hrs}$ $\mu g/m^3$	Estación monitora
27-04-2010	A	regular	166	Cerro Navia
28-04-2010	A	regular	158	Santiago
29-04-2010	A	alerta	199	Cerro Navia
30-04-2010	A	alerta	200	Quilicura
01-05-2010	BPF	alerta	202	Cerro Navia
02-05-2010	BPF	alerta	199	Cerro Navia
08-05-2010	A	alerta	198	Pudahuel
09-05-2010	A	preemergencia	274	Pudahuel
10-05-2010	A	alerta	217	Pudahuel
11-05-2010	A	regular	180	Cerro Navia
05-06-2010	A	alerta	239	Cerro Navia
06-06-2010	A	alerta	213	Cerro Navia
07-06-2010	A	regular	165	Cerro Navia
08-06-2010	A	alerta	206	Cerro Navia
30-06-2010	A	regular	175	Cerro Navia
01-07-2010	A	alerta	229	Cerro Navia
03-07-2010	A	alerta	208	Cerro Navia
09-07-2010	A	regular	189	Cerro Navia
10-07-2010	A	preemergencia	247	Cerro Navia
05-08-2010	A	regular	158	El Bosque
06-08-2010	BPF	regular	151	El Bosque

3.1.2. Inversión térmica radiativa

En las noches despejadas la superficie terrestre se enfría rápidamente, irradiando su calor a la atmósfera y enfriando más el aire contiguo a la superficie que el situado a alturas superiores. A la mañana siguiente la radiación solar calienta la superficie y el aire cercano a ella, produciéndose una capa limitada de mezclado. Durante el día el aire se sigue calentando y es probable que la inversión desaparezca[33].

3.1.3. Vaguada costera

Área de bajas presiones en superficie, que se presenta frente a la costa central de Chile y se ubica entre un sistema de alta presión fría y migratoria ubicada aproximadamente sobre el centro de Argentina y el Anticiclón subtropical del Pacífico. Intensifica y hace descender la inversión térmica lo que genera un descenso forzado de masas de aire en la ladera andina occidental (hacia el valle de Santiago) provocando viento del Este que causa acumulación de contaminantes en el poniente de la cuenca.

3.1.4. Dorsal en altura

Extensa área de altas presiones y temperaturas en altura (en la parte alta de la tropósfera). Típicamente es de forma alargada y se extiende desde la zona norte de Chile hasta el centro (Arica a Puerto Montt). Produce movimientos de descenso de masas de aire. El aire al descender, se calienta al ir pasando por áreas de mayor presión Produce una intensificación de la inversión térmica cerca de la superficie actuando como un embolo o tapa.

3.1.5. Condiciones Tipo A

Están caracterizadas por la irrupción de una dorsal cálida en altura, y presencia de una vaguada costera desde la III a la VI región, ubicada entre una alta fría migratoria ² posesionada sobre el centro norte de Argentina y la Alta Subtropical del Pacífico (anticiclón).

Durante una condición de este tipo, se produce una intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia, base ubicada normalmente bajo los 300 msnm

²Sistema de altas presiones frías, que se moviliza desde el Polo Sur hacia el Ecuador siguiendo los frentes meteorológicos.

con una diferencia de temperatura entre la base y tope de 10C. Los vientos del componente del este son débiles y se presentan calentamientos a niveles bajos. Adicionalmente hay presencia de inversión térmica radiativa nocturna en la cuenca, lo que marca una estabilidad a niveles bajos de la tropósfera en las primeras horas de la mañana [35].

Durante el período otoño-invierno, en el inicio de los episodios Tipo A, los sectores del nor-poniente de la cuenca, especialmente Pudahuel-Cerro Navia, registran un aumento más significativo de las concentraciones de MP10 respecto a las otras estaciones de monitoreo, especialmente respecto de las estaciones ubicadas en el sector oriente [3].

El proceso de estabilización asociado a la intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia, y la reducción de la capa de mezcla superficial por ser de escalas sinóptica y regional, afecta a toda la cuenca. Por lo tanto, el dispar aumento de las concentraciones en el sector poniente al inicio de los episodios A, podría ser explicado por procesos de transporte y/o recirculación de MP10 [3].

La característica distintiva del comienzo de los episodios Tipo A, es de cielos despejados en costa y valles, la presencia de vientos generalizados de componente Este a niveles bajos y anomalías negativas de la humedad relativa. Se presenta una marcada oscilación térmica diurna ($T_{m'axima}-T_{m'inima}$). Asociado al proceso de formación de la vaguada costera, se presenta subsidencia forzada en la ladera andina occidental, lo que refuerza la inversión de subsidencia y disminuye la capa de mezcla superficial [3].

En la fase de resolución o culminación de la vaguada costera, en altura el eje de la dorsal pasa a sector Argentino, siendo reemplazado por una vaguada. En superficie el gradiente de presión va de costa a interior con valores crecientes, se debilita y

desaparece la componente del Este comenzando a prevalecer una componente del Oeste. En la costa se cubre con nubosidad baja, circulación del noroeste en superficie, ascenso de la base de la inversión térmica de subsidencia, y posterior advección de aire marino a la cuenca [3].

3.1.6. Condiciones Tipo BPF

A diferencia de la condición Tipo A, se caracteriza por la presencia de una vaguada en la troposfera media, acompañando a un sistema frontal débil que pierde energía a medida que se aproxima a la cuenca de Santiago. Se produce en cordillera una componente ageostrófica del viento, que determinaría que aire descendente y seco se dirigiera hacia la baja presión ubicada sobre el Pacífico, debilitando aún más el sistema frontal.

En una configuración BPF se distingue normalmente un centro de baja presión al Este de la Cordillera de Los Andes, y una alta fría migratoria ya desplazada sobre el Atlántico. Esta condición está normalmente asociada a cobertura nubosa prefrontal del tipo media (altocúmulos, altoestratos) y alta (cirros, cirroestratos), y bajo factor de ventilación.

Las condiciones de empeoramiento prefrontal afectan un mayor número de comunas, siendo típicamente las estaciones de monitoreo de Los Cerrillos, El Bosque, Independencia y Santiago las que presentan las mayores concentraciones. El inicio de los episodios es casi simultáneo en varias estaciones de la cuenca, pero con diferentes tasas de crecimiento. La ventilación en la cuenca permanece reducida asociado a una oscilación térmica diaria débil debido a cobertura nubosa prefrontal media y alta, y estancamiento del aire. Eventualmente al inicio del episodio podrían registrarse algunos mecanismos de transporte de MP10 producto de componentes descendentes

débiles del norte y noreste de carácter prefrontal, que fortalecerían la estabilidad a niveles bajos.

La fase de salida o término del episodio BPF se produce normalmente por advección generalizada de aire frío y húmedo del oeste que afectaría en forma casi simultánea toda la cuenca, o comienzo de las precipitaciones asociadas al ingreso del sistema frontal.

La cuenca presenta normalmente cielos despejados, subsidencia forzada en la ladera andina occidental asociada a vientos del Este, y anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa, las que se reflejan mejor en las estaciones meteorológicas situadas sobre cerros y torres[3].

3.1.7. Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

El PMCA es una medida netamente meteorológica muy relevante en la predicción de las concentraciones de MP10 dentro del actual Modelo Cassmassi, aún cuando su escala discreta de valores es bastante acotada (1-5). Su valor es inversamente proporcional al factor de ventilación después del mediodía [47]. Se entiende por factor de ventilación, el producto del espesor de la capa de mezcla superficial por el viento medio dentro de la capa.

La altura de la capa de mezcla, el viento medio dentro de ésta y las condiciones de ventilación y dispersión resultantes, dependen a su vez de las condiciones meteorológicas de escalas sinóptica, regional y local.

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas, CENMA efectuó una tipificación de condiciones que a escalas sinóptica y regional están asociadas a distintos valores de PMCA.

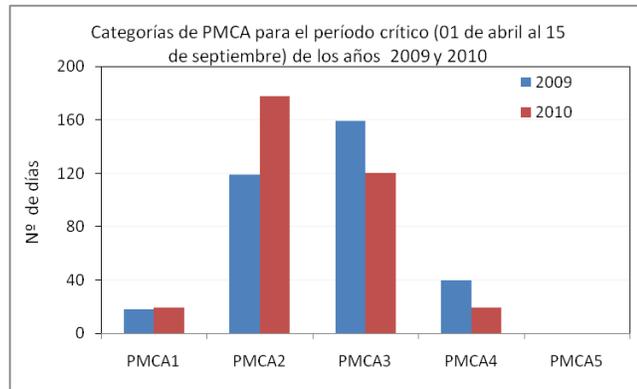
La tipificación de condiciones sinópticas asociadas a las 5 categorías del PMCA corresponden a las condiciones meteorológicas generales resumidas en la Tabla 3.2.

El PMCA es pronosticado y determinado diariamente por CENMA dos veces al día (10 a.m. y 10 p.m.). En la Fig.3.2(b) y 3.2(c), se aprecia un buen acierto en cada pronóstico de PMCA para el 2009 y 2010.

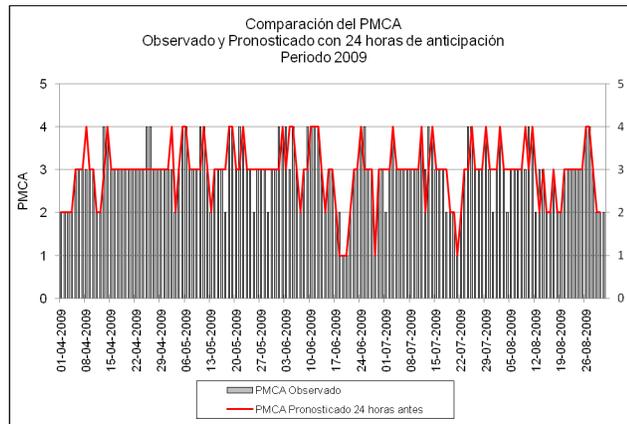
Tabla 3.2: Definición de categorías de PMCA

Categoría del PMCA	Condiciones de ventilación/dispersión de contaminantes	Características generales
1 Bajo	Muy buenas	- Ausencia de inversión térmica de subsidencia - Sistemas frontales activos - Marcada inestabilidad
2 Regular/Bajo	Buenas	- Inversión térmica de subsidencia débil y/o elevada - Sistemas frontales de regular actividad o inestabilidad ligera - Advecciones generalizadas de aire húmedo (marino) y nubosidad baja (costa) - Bajas segregadas o núcleos fríos
3 Regular	Regulares	- Predominio anticlónico normal de período invernal - Ausencia de precipitaciones - Advecciones débiles de nubosidad baja al sector poniente de la cuenca
4 Regular/Alto		- Presencia de configuraciones tipo A o BPF - Índice de circulación zonal medio o alto
5 Alto	Críticas	- Presencia de configuraciones tipo A o BPF - Bajo índice de circulación zonal

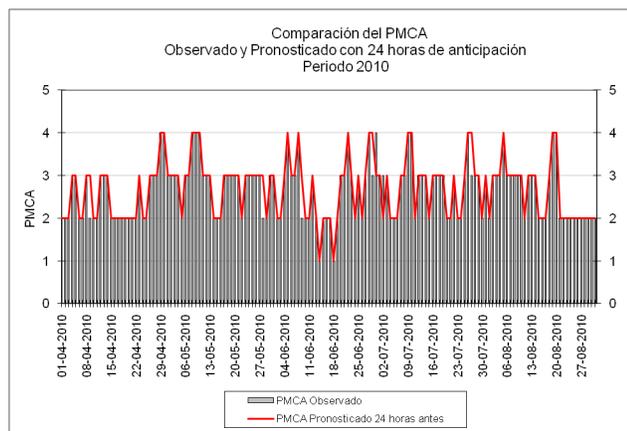
En la Fig. 3.2(a) se observa que las categorías más recurrentes para los años 2009 y 2010 fueron el *PMCA2* (regulares condiciones de ventilación) y *PMCA3* (regulares condiciones de ventilación).



(a) Categorías de PMCA observados para el período crítico de los años 2009 y 2010



(b) 2009



(c) 2010

Figura 3.2: Comparación del PMCA observado y pronosticado con 24 horas de anticipación, periodo crítico 2009 y 2010

3.2. Emisiones en la Región Metropolitana

En la actualidad CONAMA cuenta con el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) que entrega información sobre emisiones y transferencia de contaminantes del suelo, agua y aire en el país. El RETC es una base de datos de sustancias químicas o contaminantes potencialmente dañinos para la salud de la población y el medio ambiente, que permite conocer la cantidad de contaminantes que emiten las principales actividades económicas del país[19]. En el RETC los datos de emisiones atmosféricas son recabados a partir de fuentes fijas (estacionarias) y fuentes móviles (transportes en ruta).

Una serie de cuerpos normativos establecen obligación de declarar anualmente las emisiones, como por ejemplo [10] que exige la declaración por parte de distintos sectores productivos que generan grandes emisiones de contaminantes atmosféricos, señalando que los titulares de este tipo de fuentes deberán entregar a la Secretaría Regional Ministerial de Salud competente del lugar en que se encuentran ubicadas, los antecedentes necesarios para estimar las emisiones provenientes de cada una de sus fuentes.

En noviembre del año 2009 se presentó el último reporte de emisiones a nivel nacional [45] con datos de los años 2005 al 2007. Según este reporte, dentro de las fuentes consideradas para la realización de este inventario se encuentran: calderas generadoras de vapor y/o agua caliente, producción de celulosa, fundiciones primarias y secundarias, y centrales termoeléctricas, entre otras. Mientras que, para fuentes móviles en ruta, se consideran vehículos particulares, de alquiler, de uso comercial, camiones livianos, medianos y pesados, motos, buses rurales e interurbanos y taxis colectivos.

En un informe de CONAMA del año 2008 [26] se indica que en el Sistema de Administración del Inventario de Emisiones (SAIE) de CONAMA, se incluyen varios tipos de fuentes para la construcción de los inventarios, ellas son:

1. Estacionarias

1.1 Puntuales: combustión, procesos y evaporativas

1.2 De área: residencial, comercial, biogénicas, quemas e incendios forestales

2. Móviles

2.1 En Ruta: buses, camiones, vehículos particulares y comerciales, taxis y motocicletas

2.2 Fuera de Ruta: aeropuertos, maquinaria agrícola y de construcción, puertos, depósitos y terminales, transporte ferroviario

3. Fugitivas

3.1 Construcción y demolición: edificios y caminos

3.2 Polvo resuspendido: calles pavimentadas y sin pavimentar

La información del inventario del año 2009 incluye las emisiones fijas y móviles medidas y estimadas en unidades de toneladas métricas por año (Ton/año) para los años 2005, 2006 y 2007 [45]. Los valores y parámetros medidos que se muestran en la Tablas 3.3 y 3.4, son: partículas totales en suspensión (PTS), material particulado grueso (PM10), material particulado fino (PM2,5), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de azufre (SOx), amoníaco (NH3).

Tabla 3.3: Inventario nacional de fuentes de contaminación atmosférica de fuentes fijas, valores en toneladas por año (Ton/año)

año	PTS	MP 10	MP 2,5	CO	NOx	COV	SOx	NH3
2005	1.456	1.216	943	5.110	8.777	4.110	16.498	327
2006	1.927	1.664	1.449	5.383	12.765	4.586	10.169	383
2007	1.861	1.634	1.448	6.410	19.431	4.911	27.623	576

Tabla 3.4: Emisiones totales de fuentes móviles en ruta con modelo de transporte, valores en toneladas por año (Ton/año)

año	PTS	MP10	MP2,5	CO	NOx	COV	SOx	NH3
2005	1.207	1.019	707	186.740	30.970	18.562	135	897
2006	334	809	744	166.057	33.277	18.194	136	611
2007	1.149	1.149	898	66.068	22.645	12.698	122	646

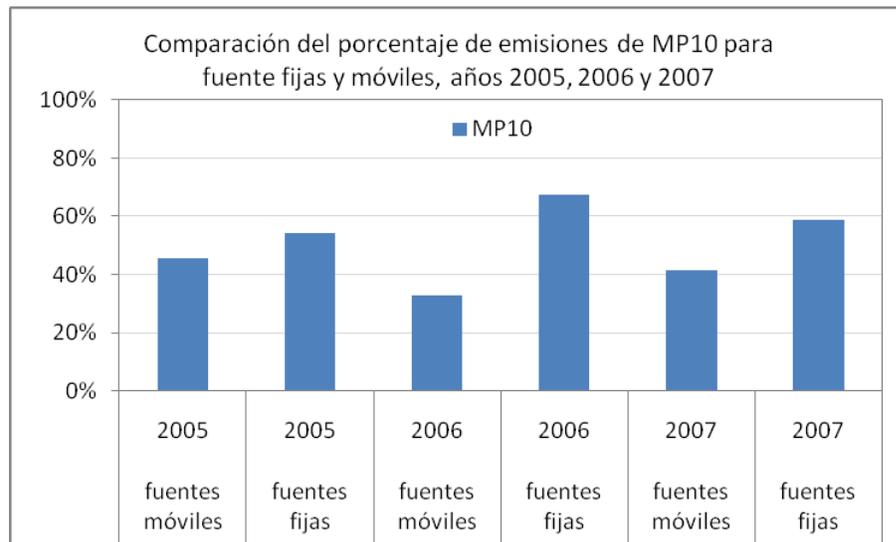


Figura 3.3: Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles de MP10 para los años 2005, 2006 y 2007

De la Fig.3.3 se observa que las fuentes fijas emiten mayor cantidad de MP10 que las fuentes móviles, con un promedio para los 3 años de 60% versus un 40%,

respectivamente. El cambio de tendencia observado en el MP10 para los años 2005, 2006 y 2007 es una clara advertencia de la complejidad que va adquiriendo la gestión de la calidad del aire en la Región Metropolitana.

De las Figuras A.1(a), A.1(b) y A.1(c) del apéndice A se desprende que las fuentes fijas son las que generan mayores emisiones de material particulado (PTS, MP10 y MP2,5) y de óxidos de azufre (SOx). Mientras que las fuentes móviles aportan con mayores emisiones de gases a la atmósfera (CO, NOx, COV y NH3). En este contexto, como promedio de los 3 años, las fuentes fijas emiten un 32% de NOx versus un 68% de las fuentes móviles. Sin embargo, las primeras emiten un total de 99% de SOx versus un 1% de las segundas.

El último inventario de emisiones de MP 10 proveniente de fuentes fijas de CONAMA es de marzo del año 2008 (documento entregado por CONAMA RM), algunos de los valores reportados en este inventario se muestran en la Tabla 3.5, donde se observa que el total de las fuentes registradas emiten una cantidad total de 4.283 Kg/día o 1.280 Ton/año (calculado en base a los días de operación de las fuentes) de MP10.

*Para sumar las emisiones de las fuentes se utilizó el criterio de considerar sólo las fuentes con emisiones superiores a 1 [Kg/día].

Tabla 3.5: Inventario de emisiones de fuentes fijas del año 2008

Rango de emisión de las fuentes [Kg/día]*	Número de empresas	Número de fuentes	% del total de fuentes emisoras	Emisiones totales [Kg/día]	% del monto total de las emisiones
Completo	3.719	8.399	100	4.283	100
menor que 1	3.498	7.884	94	950	22
mayor que 1	221	515	6	3.314	77
mayor que 1	70	290	3,5	2.917	68
mayor que 1	25	170	2	2.311	54

Del total de las empresas catastradas en el inventario de CONAMA del año 2008, se observa que se han registrado todo tipo de rubros, desde grandes empresas, como Aceros Chile S.A. hasta microempresas, como panificadoras y comunidades de edificios. Los datos mostrados en la Tabla 3.5 permiten observar que las 25 empresas más contaminantes, poseen un total de 170 fuentes de emisión de MP10, que representan sólo el 2% del total de fuentes de la RM. Sin embargo, concentran un 54% del total de las emisiones diarias de MP10. De estas 25 empresas, las mayores emisiones de MP10 son generadas por la totalidad de fuentes declaradas por Cemento Polpaico S.A.

Esta gran cantidad de fuentes emisoras ha generado que en la RM los niveles de MP10 se mantengan altos durante el período invernal, generando episodios críticos de contaminación. Sin embargo, se han tomado medidas que han tenido una positiva incidencia en la calidad del aire de la región. Dentro de estas medidas se encuentra la desulfuración de los combustibles, incorporación del gas natural a la matriz energética, exigencia del convertidor catalítico para vehículos livianos y la progresiva reestructuración del sistema de transporte público. El PPDA ha contribuido significativamente en la tendencia a la disminución de las concentraciones de todos los contaminantes normados (MP10, SO₂, O₃, CO, NO₂), lo que ha conducido a superar la situación de saturación por CO y de latencia por NO₂ en la RM. No obstante, a partir del año 2005, el crecimiento de la actividad industrial y del parque vehicular, junto con las restricciones al suministro de gas natural, se han traducido en una presión al alza de las emisiones en la región.

Capítulo 4

Monitoreo y requerimientos de un sistema de pronóstico de calidad del aire para la Región Metropolitana

4.1. Red MACAM III

El monitoreo de la calidad del aire en Chile, comenzó en la década del 60 con la donación de equipos por parte la Oficina Sanitaria Panamericana, que conformó la RED PANAIRE junto con otros países de Latinoamérica, y desde ese entonces la contaminación atmosférica comenzó a ser estudiada de forma sistemática en la ciudad de Santiago[48].

El comienzo de la década de los 80 significó un nuevo avance en el monitoreo y estudio de contaminantes atmosféricos, al integrarse la autoridad política regional a

través de la Intendencia de la Región Metropolitana, que en 1987 realizó la instalación de la primera red de monitoreo automático Red MACAM I, gracias a la ayuda del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En ese momento se instalaron dos estaciones de monitoreo, una fija en la comuna de Santiago y una móvil en Las Condes[48].

Con el fin de contar con equipos más modernos para realizar una gestión más eficiente en la entrega de la información, en 1997 se inició la expansión de la Red MACAM I, que fue financiada con un 80% de inversión del Gobierno de Japón y con un 20% del Ministerio de Salud de Chile, dando origen a la Red MACAM II, oficializada por la Comisión Nacional del Medio Ambiente[48]. Además de las estaciones existentes en las comunas de Santiago y Las Condes, se incorporaron las estaciones de las comunas de Cerrillos, El Bosque, Independencia, La Florida y Pudahuel [21].

Posteriormente en marzo de 2001 comenzó a operar la estación de monitoreo de Cerro Navia y en mayo del 2008 comenzaron a operar 3 nuevas estaciones en las comunas de Quilicura, Talagante y Puente Alto, dando origen a la Red MACAM III que cuenta actualmente con 11 estaciones de monitoreo.

En la Fig. 4.1 se muestran las 11 estaciones de la Red MACAM III, con sus respectivas alturas en metros sobre el nivel del mar (msnm).

La Red MACAM III cuenta con equipamiento para medir los 5 contaminantes atmosféricos normados en Chile: material particulado (MP10), ozono (O3), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2) y monóxido de carbono (CO) [5].

Los datos de las 8 estaciones de monitoreo de la Red MACAM III mencionadas anteriormente han sido utilizados como fuente de información para el modelo predictivo, sin embargo, luego del estudio de rediseño de la Red Macam II en el año

2007 realizado por el Centro Mario Molina Chile, CONAMA en parte recogió las recomendaciones para la implementación, en el año 2008, de las nuevas estaciones de monitoreo en las comunas de Quilicura, Puente Alto y Talagante, dando origen a la Red Macam III. El objetivo de estas estaciones es la representación de la fotoquímica de la Región Metropolitana. El estudio sugirió instalar las estaciones en las comunas de El Monte para la representación del background rural (BR) y la estación de Colina para la representación del background suburbano (BSU), además del establecimiento de la estación de Cerro Navia como background urbano (BU). Este estudio no realizó la recomendación de la instalación de la estación en Puente Alto [32].

En particular, la medición de las concentraciones de MP10 está estipulada en [12] y aprobada por la EPA (Environmental Protection Agency) donde se señala que se puede utilizar un método por transducción gravimétrica de oscilaciones inducidas, a través de una microbalanza de oscilación de sensor voladizo con cabezal MP-10.

Principalmente son 2 los métodos utilizados por la Red MACAM para la medición de MP10, el monitor TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) que mide en forma directa y continua PM10, PM2,5 y PTS y el monitor dicotómico que permite separar la fracción fina y gruesa del MP10 mediante filtros.

La información contenida en este trabajo se basa en la medición de MP10 con equipos TEOM 1400 de la empresa norteamericana THERMO SCIENTIFIC.

El TEOM utiliza un tubo hueco oscilante con un filtro ubicado en el borde libre, y debido a la acumulación de partículas, la masa del filtro cambia y la frecuencia de oscilación del filtro también cambia, proporcionando una medición de la masa. El tubo angosto, el filtro y el aire de la muestra son mantenidos a 50C para evaporar los gases volátiles y que no afecten a la medición. El intervalo de la muestra de 15



Figura 4.1: Red MACAM III

minutos, por lo tanto, para obtener un valor horario de concentraciones de MP10 se realiza un promedio de los 4 valores medidos por el equipo cada hora.

El error instrumental del TEOM depende de la medición que se realice. En este sentido si se utiliza en un sitio de monitoreo donde hay altas concentraciones de compuestos orgánicos/no orgánicos volátiles o semivolátiles, la medición puede arrojar un mayor porcentaje de error, como por ejemplo, si se quiere medir nitrato de amonio.

Cada una de las estaciones de la Red MACAM III es clasificada como estación de monitoreo de MP10 con representatividad poblacional (EMRP), lo que implica que debe cumplir simultáneamente los siguientes criterios [12]:

i) Que exista al menos un área edificada (población expuesta) habitada en un círculo de radio de 2 Km, contados desde la posición de la estación;

ii) Que esté situada a más de 15 metros de la calle o avenida más cercana que tenga un flujo igual o superior a 2.500 vehículos/día;

iii) Que esté situada a más de 50 metros de la salida de un sistema de calefacción (que utilice carbón, leña o petróleo equivalente a petróleo-2 o superior) o de otras fuentes fijas similares.

En la Tabla 4.1 se muestra la letra código con que la Autoridad Sanitaria identifica cada estación de la Red MACAM III y que será utilizada frecuentemente en el texto de este trabajo, la fecha del comienzo de la operación de cada estación, y su posición geográfica en coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator).

Tabla 4.1: Estaciones de la Red MACAM III

Estación	Código	Fecha de entrada en operación	UTM E huso 19	UTM N huso 19
Independencia	F	31/12/1987	346488	6300681
Santiago	N	31/12/1987	345904	6296352
Las Condes	M	31/12/1987	358363	6306237
Cerrillos	P	02/04/1997	340874	6292794
Pudahuel	O	03/04/1997	337514	6299135
El Bosque	Q	04/04/1997	345524	6287169
La Florida	L	27/05/1997	352504	6290304
Cerro Navia	R	26/03/2001	339183	6299679
Puente Alto	S	20/05/2008	344719	6295935
Talagante	T	22/05/2008	344313	6295529
Quilicura	V	18/05/2008	337355	6306787

4.2. Normativa ambiental vigente para MP10 (Decreto Supremo 59/1998)

4.2.1. Valores que definen situaciones de emergencia

Los niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para MP10, además de los valores que no definen actualmente situaciones de emergencia [12], se muestran en la Tabla 4.2 como valores de concentraciones de 24 horas¹ expresados en $\mu g/m^3$ y su equivalente Índice de Calidad del Aire por Partículas (ICAP) [23].

Tabla 4.2: Definición de rangos de MP10 que definen el estado de la calidad del aire

Nivel	Tipo Categoría	Concentración de 24 horas MP10 $\mu g/m^3$	ICAP
Nivel 0	Bueno	0-150	0-100
Nivel 0	Regular	151-194	101-200
Nivel 1	Alerta	195-239	201-300
Nivel 2	Pre-emergencia	240-329	301-500
Nivel 3	Emergencia	330 o superior	501 o superior

El ICAP es el indicador con que la autoridad competente determina si se está en presencia o no de un episodio catalogado como crítico (Nivel 1, 2 o 3), es decir, en días en que se alcancen niveles que superen el índice 200 de ICAP, o la concentración de 24 horas de MP10 de $195 \mu g/m^3$, se estará en presencia de un episodio crítico.

El ICAP es una herramienta usada por la EPA y otras agencias ambientales para proveer al público información oportuna y fácil de comprender sobre la calidad del aire local. También indica si los niveles de polución son perjudiciales para la salud.

¹Corresponde a la media aritmética (promedio) de los valores efectivamente medidos de concentración de MP10 en cada estación monitorea en 24 horas consecutivas. En caso de pérdida parcial de información horaria, el número de valores a considerar en el cálculo de la media será mayor o igual que el equivalente a 18 horas [12], [23].

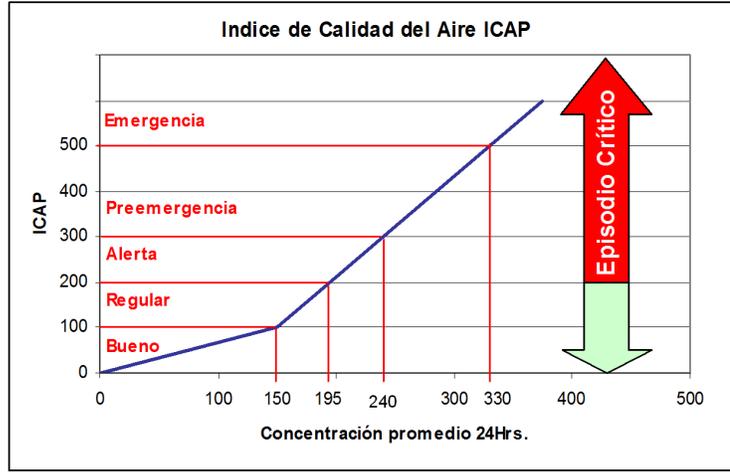


Figura 4.2: Definición del ICAP

$$ICAP = 0,67 * MP10, \quad (4.1)$$

para $MP10 < 150 \mu g/m^3$

$$ICAP = 2,22 * MP10 - 233, \quad (4.2)$$

para $MP10 > 150 \mu g/m^3$

La equivalencia entre ICAP y las concentraciones máximas de 24 horas de MP10 se muestra en la Fig. 4.2, donde se observan dos tramos de la curva, el primero tiene como límite, el valor de la norma de calidad primaria para MP10, de $150 \mu g/m^3$. Mientras que segundo tramo, no tiene un límite definido. Para hacer la conversión entre concentración máxima de 24 horas e ICAP se aplican las ecuaciones empíricas

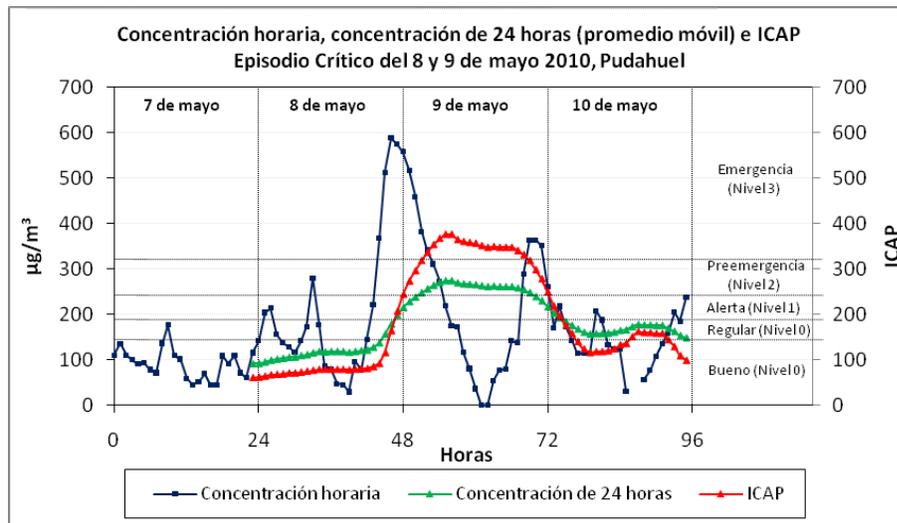


Figura 4.3: Serie de tiempo MP10 de un episodio crítico 2010, para ilustrar las diferencias entre concentraciones horarias, concentración de 24 horas, promedio móvil de 24 horas e ICAP.

4.1, 4.2, definidas por la Autoridad Ambiental[23].

La concentración de 24 horas se calcula para cada hora del día (desde las 0 hasta las 23 horas) y corresponde al promedio de los valores efectivamente medidos de concentración horaria de MP10 en cada estación monitora en 24 horas consecutivas. De esta manera, la concentración de 24 horas de las 10 a.m. del día actual se calcula considerando los 23 valores anteriores (24 horas en total desde las 10 a.m. de ayer hasta 10 a.m. de hoy). Este procedimiento se aplica a la serie de tiempo² de datos horarios completa, y estadísticamente se utiliza para suavizar la serie de datos horarios.

Por otra parte, el valor máximo de concentración de 24 horas para un día, co-

²Se llama serie de tiempo a un conjunto de mediciones de cierto fenómeno o experimento registrado secuencialmente en el tiempo. El primer paso para analizar una serie de tiempo es graficarla, esto permite: identificar la tendencia, la estacionalidad, las variaciones irregulares (componente aleatoria).

responde al mayor valor de concentración de 24 horas registrado en ese día y puede ocurrir a cualquier hora. En la Fig.4.3 este valor corresponde a una concentración de 24 horas de $274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 376 ICAP, respectivamente, a las 7 de la mañana para el día 9 de mayo de 2010.

Como el ICAP se calcula a partir de las concentraciones de 24 horas, se observa que ambas curvas comienzan en el mismo punto desfasadas de las concentraciones horarias.

El ICAP se enfoca en los efectos en la salud, que pueden ocurrir dentro de unas horas o días después de respirar el aire, lo que tiene bastante sentido en cuanto al resguardo de la salud de la población, pero no con respecto a la aplicación de un pronóstico, tal como se muestra en la la Fig.4.3 donde tanto el ICAP como las concentraciones de 24 horas entregan información del pasado o de lo que ocurrió el día anterior. Se observa que las concentraciones de 24 horas se muestran altas (Nivel 2) cuando las concentraciones horarias estuvieron altas el día anterior, donde la población estuvo expuesta a altos niveles sin saberlo. Es decir, para predecir lo que sucederá al día siguiente ($D0 + 1$) se utiliza información correspondiente al día anterior ($D0 - 1$) al pronóstico ($D0$).

Por otra parte, el ICAP además de entregar información desfasada registra valores de emergencia (Nivel 3) cuando en las concentraciones de 24 horas se registra preemergencia (Nivel 2).

Se considera como un dato relevante la ocurrencia histórica de episodios críticos (alerta, preemergencia y emergencia) constatados durante el periodo crítico de contaminación atmosférica en la R. M. En la Fig. 4.4 se muestra el número de ocurrencia de estos episodios desde el año 1997 al año 2010[5].

El balance de episodios críticos constatados en la R.M. se muestra en la Tabla4.3

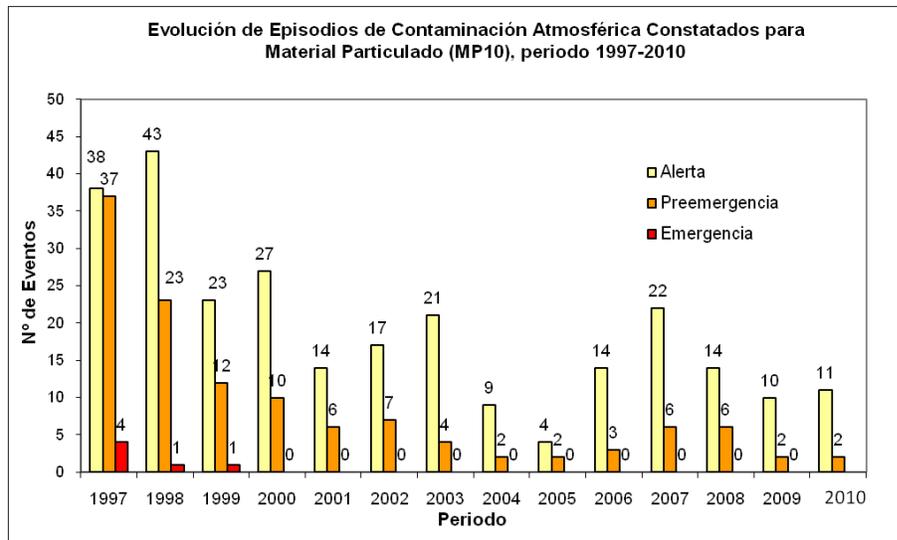


Figura 4.4: Número de episodios críticos constatados por la Red MACAM entre los años 1997 y 2010

[16].

Tabla 4.3: Balance de episodios críticos 2006-2010

Año	Alertas	Preemergencias	ICAP máximo	Total episodios	último episodio
2006	14	3	344	17	2 agosto
2007	22	6	409	28	11 agosto
2008	14	6	444	20	25 julio
2009	10	2	391	12	25 julio
2010	11	2	376	13	10 julio

4.2.2. Requerimientos para la aplicación de un modelo de pronóstico de MP10

Dentro de las exigencias más relevantes para la implementación de las metodologías de pronóstico de MP10 para la gestión de episodios críticos de contaminación por

material particulado MP10, que se encuentran estipulados en el Decreto Supremo 59/1998, se encuentran las siguientes:

1. Debe entregar el valor máximo de concentración promedio móvil de 24 horas esperado para el periodo de 0 a 23 horas del día siguiente o un periodo superior, expresadas en $\mu g/m^3$, para cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la Red MACAM III clasificadas como EMRP que hayan alcanzado al menos alguno de los niveles de emergencia (1, 2 y 3) señalados en la Tabla 4.2.

2. Debe entregar una confiabilidad (acierto) del pronóstico en el periodo de validación superior al 65 % por estación monitorea clasificada como estación monitorea con representatividad poblacional.

La confiabilidad del pronóstico es el porcentaje de días dentro del periodo de validación³ en que, en una estación clasificada como estación de monitoreo de MP10 con representatividad poblacional (EMRP), el nivel constatado (medido) para el día coincide con el nivel pronosticado.

A la fecha se han utilizado 3 modelos para el pronóstico de la calidad del aire de la Región Metropolitana: i) 1999: Modelo CONAMA 98, desarrollado por el Ing. Jorge Cáceres (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile) [2]

ii) 2000-2010: Modelo Cassmassi, desarrollado por el Dr. Joseph Cassmassi (Senior Meteorologist Meteorology Unit, South Coast Air Quality Management District, California, USA) [29], [30], [28]

iii) 2006: Modelo Red Neuronal, desarrollado por el Dr. Patricio Pérez (Departamen-

³Es el conjunto de días usado para evaluar la confiabilidad del pronóstico. Este periodo deberá corresponder al menos al mismo conjunto de días del año para el que fue concebido el método de pronóstico. En este periodo no se podrá incluir información distinta de aquella con la que se construyó la aplicación de la metodología de pronóstico [12].

to de Física, Facultad de Ciencia, Universidad de Santiago de Chile) [40], [41]

De acuerdo al plan operacional de gestión de episodios críticos [13], el pronóstico se realiza en CENMA a las 10 horas, se entrega a CONAMA a las 12 horas, se ratifica a las 18 horas y se entrega a los medios de comunicación en caso de no pronosticar un nivel de alerta, en caso contrario, la información se entrega a la Intendencia Metropolitana que determina las medidas a seguir.

Para dar cumplimiento con los requerimientos del PPDA, en 1998 se oficializó la primera aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire en la ciudad de Santiago, en uso a partir de julio del año [2], [22].

Como una forma de optimizar esta herramienta, en 1999 CONAMA encargó un estudio para mejorar la metodología de pronóstico de calidad de aire en la Región Metropolitana. El estudio dio como resultado un nuevo modelo de pronóstico, el modelo Cassmassi, que ha sido aplicado oficialmente por la Autoridad Ambiental desde el año 2000 a la fecha.

En base al trabajo realizado por J. Cassmassi, la metodología de pronóstico diario (durante el periodo crítico) de concentraciones máximas de 24 horas de MP10, está basada en algoritmos lineales de cálculo desarrollados mediante aplicación de técnicas estadísticas de regresión lineal múltiple, enfocadas a encontrar relaciones entre posibles variables predictivas y la variable a predecir.

La concentración pronosticada para el día siguiente con el modelo Cassmassi, se calcula mediante ecuaciones diferentes para cada estación de monitoreo de calidad de aire y se decreta un episodio crítico para toda la Región Metropolitana, independientemente de la estación monitorea para la que realizó el pronóstico.

Los resultados de un pronóstico de calidad del aire generalmente son presentados

en forma de tablas de contingencia, donde se resume el número de casos observados de cada categoría, clasificados según la categoría estimada por el modelo de pronóstico [44].

Pese a que la aplicación del modelo Cassmassi ha sido oficial desde el año 2000 a la fecha, durante el año 2006, la aplicación del sistema de pronóstico fue realizada paralelamente y de forma piloto entre el modelo oficial y el modelo Red Neuronal, con el fin de entregar información complementaria.

La comparación del desempeño de los modelos Cassmassi y Neuronal para el año 2006 se muestran en las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6. En ellas se observa que el modelo de Red Neuronal de la Universidad de Santiago de Chile mostró una cierta mejora en algunos aspectos relacionados con días de “alerta”. Sin embargo, no es evidente si es por el método matemático o porque fue entrenado con datos más recientes, ya que el modelo Cassmassi no se había actualizado en esa fecha (ni en la actualidad). Con respecto a días de preemergencia, ambos modelos muestran nula capacidad de acierto.

En particular, para los casos en que se pronostica una “alerta”, un acierto significa que tanto el pronóstico como la observación fueron “alerta”. En este sentido, una falsa alarma (FA) significa que el pronóstico fue “alerta”, pero se observó la categoría de nivel 0, es decir, “bueno-regular. Mientras que un evento no alertado (ENA) significa que el pronóstico fue alerta, pero se observó “preemergencia”.

Por otra parte, se realiza un análisis similar entre alertas y preemergencias. Las FA en este caso representan el porcentaje de los pronósticos de preemergencia cuando se observó “bueno-regular” o “alerta”. Mientras que los ENA representan el porcentaje de observaciones de “preemergencia” en casos en que el pronóstico fue “bueno-regular” o “alerta”.

Tabla 4.4: Tabla de contingencia para días con pronóstico de alerta para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006

Alertas (Pronosticadas)		
	Cassmassi	Neuronal (USACH)
Falsa alarma (FA)	77 %	53 %
Eventos no alertados (ENA)	0 %	13 %
Acierto	23 %	34 %
Número de pronósticos	31	15

Tabla 4.5: Tabla de contingencia para días con observación de alerta para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006

Alertas (Observadas)		
	Cassmassi	Neuronal (USACH)
Eventos no alertados (ENA)	26 %	66 %
Número de días de alertas observadas	15	15

Tabla 4.6: Tabla de contingencia para días con pronóstico y/u observación de pre-emergencia para los modelos Cassmassi y Neuronal 2006

Preemergencias (Pronosticadas y Observadas)		
	Cassmassi	Neuronal (USACH)
Falsa alarma (FA)	100 %	100 %
Eventos no alertados (ENA)	100 %	100 %

Capítulo 5

Aplicación del Modelo Cassmassi a las tres nuevas estaciones de la Red MACAM III

5.1. Descripción del Modelo Cassmassi

El Modelo Cassmassi es un modelo de tipo estadístico, cuya metodología de pronóstico de los valores máximos de concentraciones de 24 horas de MP10 en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de 0 a 23 horas del día siguiente, está basada en algoritmos lineales de cálculo desarrollados mediante la aplicación de técnicas estadísticas de regresión lineal múltiple[38], enfocadas a encontrar relaciones entre posibles variables predictivas (meteorológicas y de calidad del aire) y la variable a predecir.

Las variables consideradas en los análisis de J. Cassmassi como posibles predictores fueron [29], [30]:

- i) Grupo de 62 variables meteorológicas observadas por radiosondeo de la Di-

rección Meteorológica de Chile (DMC) en Quintero a las 1200 UTC (8 a.m. hora local en invierno). Dentro de esas variables se encuentran las siguientes: dirección y velocidad del viento, punto de rocío, humedad relativa y temperatura a los 500hPa, 850hPa y 925hPa; altura de los 500hPa y los 1000hPa; altura en la base y en el tope de la inversión térmica; temperatura en la base y en el tope de la inversión térmica; presión en la base y en el tope de la inversión térmica. De ellas, 33 corresponden a variables de altura, mientras que las otras 29 corresponden a cambios de 24 horas esperados entre las variables medidas en altura.

ii) Índices de condiciones meteorológicas a escala sinóptica y regional observadas y pronosticadas para la Región Metropolitana (DIFF).

iii) Variables de calidad del aire de MP10, específicamente el valor observado el día actual a las 10 a.m. de la concentración de 24 horas de MP10.

iv) Índices de variaciones esperadas de emisiones según día de la semana (índice de día feriado/no feriado, factor de cambio de concentraciones según día de la semana, factor de cambio de concentraciones según día de la semana específico para cada estación de monitoreo).

El algoritmo de cálculo para la realización del pronóstico, se señala en la Ec. 5.1.

$$Y = \sum_{i=1}^n A_j * x_j$$
$$Y = A_0 * x_0 + A_1 * x_1 + A_2 * x_2 + \dots + A_n * x_n \quad (5.1)$$

Donde Y es la variable dependiente y corresponde a la concentración máxima de 24 horas de MP10 que se quiere pronosticar para cada estación de monitoreo; A_j son los coeficientes de las variables independientes que miden el efecto separado que esta variable tiene sobre la variable dependiente e indica en cuánto incrementa o

disminuye Y por cada unidad adicional de la variable correspondiente; A_0 representa la parte de Y que no varía directamente con las variables independientes (intercepto), lo que podría interpretarse como la concentración background (de base) de cada sitio de monitoreo.

En particular, como un ejemplo de la aplicación de esta metodología, el algoritmo o ecuación de pronóstico utilizada actualmente para la estación de La Florida, se muestra en la Ec.5.2. En esta ecuación, $[MP10 - 24horas]_{m'axima,L}$ representa el valor máximo esperado de concentración de 24 horas en $\mu g/m^3$, DIFF es la diferencia entre el PMCA esperado para el día siguiente y el observado el día actual, C10-1D es el valor de concentración de 24 horas esperado a las 10 de la mañana del día siguiente a partir del ciclo semanal La Florida, TEND es el valor de la tendencia de una hora de las concentraciones de 24 horas (se toma la diferencia de valores entre las 10 a.m. y las 9 a.m.) y MP10AM es el valor observado a las 10 a.m. del día actual de concentración de 24 horas. El análisis de regresión lineal múltiple, ayudará a determinar qué variables tienen mayor peso en la predicción.

$$\begin{aligned}
 [MP10 - 24horas]_{m'axima,L} &= 58,0 + 15,4 * DIFF + 0,31 * C10 - 1D_L \\
 &+ 24,2 * TEND + 0,32 * MP10AM_L \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

5.2. Análisis de datos de calidad del aire para MP10

Las nuevas estaciones de la Red MACAM III (Talagante, Puente Alto y Quilicura) sólo cuentan con datos ratificados por el Ministerio de Salud para el año 2009. Mientras que los datos del año 2010 se encuentran validados por los operadores de la red. Por lo que a diferencia del análisis de datos realizados en 1999 [29], se deberá uti-

lizar el periodo de un año de datos en vez de dos, a pesar que la recomendación es utilizar más de un año de datos debido al potencial sesgo que puede surgir de la singularidad de los patrones de un solo año de meteorología observada.

Para construir las ecuaciones de pronóstico de las nuevas estaciones se realizará el análisis de datos para el año 2009, considerando estrictamente el periodo crítico de contaminación atmosférica comprendido entre el 01 de abril y el 31 de agosto. Mientras que para la verificación del pronóstico se utilizarán datos de los años 2009 y 2010. Finalmente, se compararán los pronósticos realizados para el 2010 obtenidos con los nuevos algoritmos, con el pronóstico global del Modelo Cassmassi.

Para la incorporación de las 3 nuevas estaciones de monitoreo se aplicará el análisis realizado a la base de datos de series de tiempo en [29]. A continuación se especifican estos análisis para año 2009.

5.2.1. Estadística descriptiva de las series de tiempo de concentraciones de 24 horas de MP10

Para las series de tiempo de las concentraciones máximas de 24 horas y de las 10 a.m., se consideró el número de días monitoreados y se calcularon los promedios, desviaciones estándar, rango de las mediciones, valores mínimos y máximos, con el objeto de caracterizar la distribución de los datos de las series de tiempo. En las Tablas 5.1 y 5.7 se muestran los resultados.

Estos análisis fueron realizados para las 11 estaciones de monitoreo de la Red MAMCAM III, para verificar si durante el año 2009 se registraron niveles de emergencia (1, 2 y 3) señalados en la Tabla 4.2 que indicarían la pertinencia de aplicar un modelo de pronóstico. Las series de tiempo de concentraciones de 24 horas de MP10 que originan estos valores se muestran en el Apéndice B.

Se realizan todos los análisis con los valores máximos diarios y de las 10 a.m. de las concentraciones de 24 horas, debido a que el pronóstico de los primeros, se realiza con datos de los segundos. Por esta razón, resulta de gran interés conocer la diferencia en el comportamiento entre ambas variables.

Tabla 5.1: Estadística descriptiva de las series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 para las estaciones de monitoreo de la Red MACAM III

Estación	Número de días	Promedio	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Independencia	139	87,0	28,0	21	199	178
La Florida	153	106,2	28,9	30	183	153
Las Condes	152	64,7	23,0	11	134	123
Santiago	153	104,5	34,0	25	206	181
Pudahuel	153	107,8	44,1	23	242	219
Cerrillos	152	95,4	32,7	24	238	214
El Bosque	153	105,0	33,6	24	219	195
Cerro Navia	153	118,2	49,1	24	281	257
Puente Alto	153	67,0	20,9	14	138	124
Talagante	152	66,4	26,6	15	161	146
Quilicura	152	113,3	43,8	23	229	206

Tabla 5.2: Estadística descriptiva de las series de tiempo de los valores diarios de las 10 a.m. de concentraciones de 24 horas de MP10 para las estaciones de monitoreo de la Red MACAM III

Estación	Nmero de días	Promedio	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Independencia	138	75,1	28,8	13	184	171
La Florida	153	91,7	31,9	11	164	153
Las Condes	147	56,1	23,7	8	126	118
Santiago	153	89,1	35,2	16	183	167
Pudahuel	153	89,1	45,0	8	231	223
Cerrillos	152	80,4	33,1	14	224	210
El Bosque	153	89,1	34,9	13	205	192
Cerro Navia	153	97,6	50,7	10	273	263
Puente Alto	151	58,0	21,7	10	132	122
Talagante	151	55,5	27,2	9	161	152
Quilicura	153	95,8	43,9	11	217	206

Se observa que los mayores rangos de las concentraciones se presentan en las estaciones de Cerro Navia, Pudahuel y Quilicura. Mientras que los menores se presentan

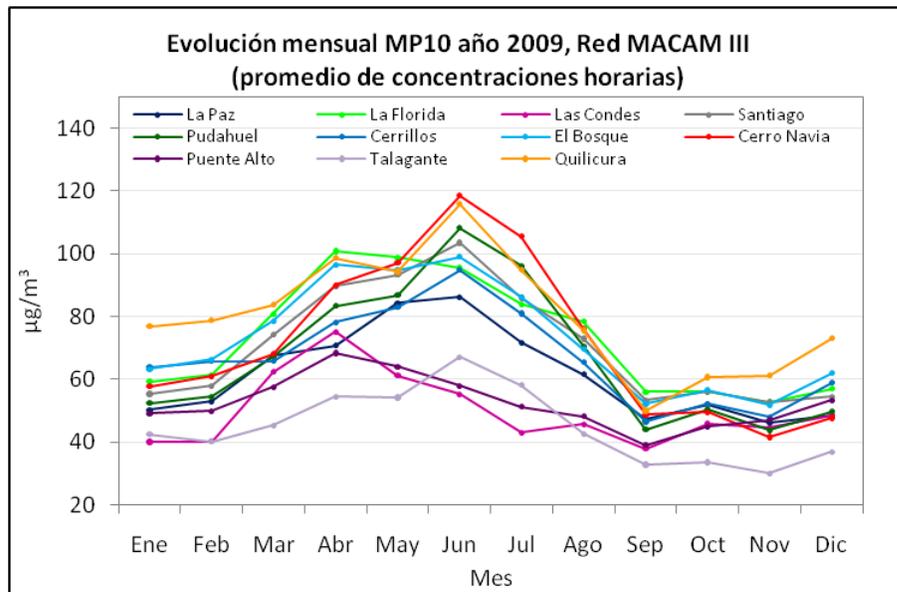


Figura 5.1: Concentraciones mensuales promedio de los datos horarios para el año 2009 de las estaciones de la Red MACAM III

en Las Condes, Puente Alto y Talagante, en ambas variables. Estos datos indican en qué estaciones se generan los mayores y menores concentraciones de MP10 respectivamente.

En la Fig. 5.1 se muestra el promedio mensual de concentraciones de MP10 para el año 2009 en las 11 estaciones de la Red MACAM III, único año que cuenta con las mediciones diarias y mensuales completas de todas las estaciones, donde se observa que los mayores valores se produjeron para el año 2009 en los meses de abril y junio, mientras que los mayores valores peak se produjeron en junio en las estaciones de Cerro Navia, Quilicura y Pudahuel, respectivamente.

5.2.2. Análisis de correlación entre las concentraciones de MP10 de cada estación de monitoreo

Se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones horarias de las 11 estaciones con el objeto de determinar cuáles de ellas presentan un comportamiento similar temporalmente con las demás, y determinar si existen relaciones significativas entre las 3 nuevas estaciones con alguna de las estaciones que cuentan con algoritmo de pronóstico.

Tabla 5.3: Correlación entre las concentraciones horarias de MP10 para las 11 estaciones de monitoreo de la Red MACAM III, 2009-2010

Estación	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V
F	1,00										
L	0,70	1,00									
M	0,52	0,53	1,00								
N	0,77	0,68	0,42	1,00							
O	0,63	0,57	0,21	0,68	1,00						
P	0,72	0,56	0,33	0,78	0,76	1,00					
Q	0,71	0,77	0,36	0,72	0,70	0,71	1,00				
R	0,67	0,61	0,22	0,74	0,94	0,80	0,74	1,00			
S	0,67	0,75	0,53	0,60	0,50	0,57	0,71	0,53	1,00		
T	0,58	0,50	0,23	0,60	0,66	0,67	0,57	0,70	0,47	1,00	
V	0,69	0,60	0,35	0,68	0,76	0,72	0,69	0,79	0,55	0,62	1,00

En la Tabla 5.3 se observa que para el año 2009 Puente Alto (S) muestra la mayor correlación con las estaciones de La Florida (L) y El Bosque (Q) (estaciones del sector sur-poniente de la R.M.), lo que se utilizará como guía para identificar las variables que podrían generar ecuaciones de pronóstico.

Talagante tiene la correlación más alta con Cerro Navia (R), seguida de Cerrillos (P) y Pudahuel (O), aún cuando se encuentra bastante alejada de estas estaciones, que probablemente se debe condiciones similares de ventilación.

La estación de Quilicura (V) tiene la correlación más alta con Cerro Navia (R) y

Pudahuel (O) respectivamente, sin embargo, esta información no será de gran utilidad porque la estación Cerro Navia (R) no cuenta con ecuación de pronóstico y Pudahuel (O) considera variables meteorológicas. Se utilizarán las variables relacionadas a las estaciones de La Florida (L) y Cerrillos (P) principalmente.

Mientras que las estaciones de Cerro Navia (R) y Pudahuel (O) muestran la mayor correlación entre todas las estaciones, con un coeficiente de correlación de 0,918. Las Condes (M) presenta la más baja correlación con cada una de las estaciones, dando luces que en esa estación sólo se representan las concentraciones del sector oriente de la Región Metropolitana.

5.3. Desarrollo del modelo

Para construir las ecuaciones de pronóstico de las estaciones de monitoreo se utilizarán paquetes de variables relacionadas con las concentraciones de 24 horas de MP10 medidas el día actual del pronóstico, la tendencia de las concentraciones, distintos índices de cambio de emisiones esperadas para el día siguiente y valores observados y esperados del PMCA.

Algunas de las variables que serán utilizadas en los modelos no requieren mayores definiciones y son utilizadas bajo las condiciones de entrega matutina del pronóstico a la autoridad, como MP10AM que corresponde al valor de las 10 de la mañana de concentración de 24 horas de MP10, DIFF que corresponde a la diferencia entre el valor pronosticado de PMCA para el día siguiente y el PMCA observado el día actual, y TEND que corresponde a la tendencia de una hora (diferencia entre el valor de las 10 a.m. y el de las 9 a.m.) de las concentraciones de 24 horas de MP10.

De acuerdo el criterio de J. Cassmassi, a la variable TEND se le asigna el valor 1 si es 0 o positiva, y 0 si es negativa. Según la Fig. 5.2 la tendencia promedio de

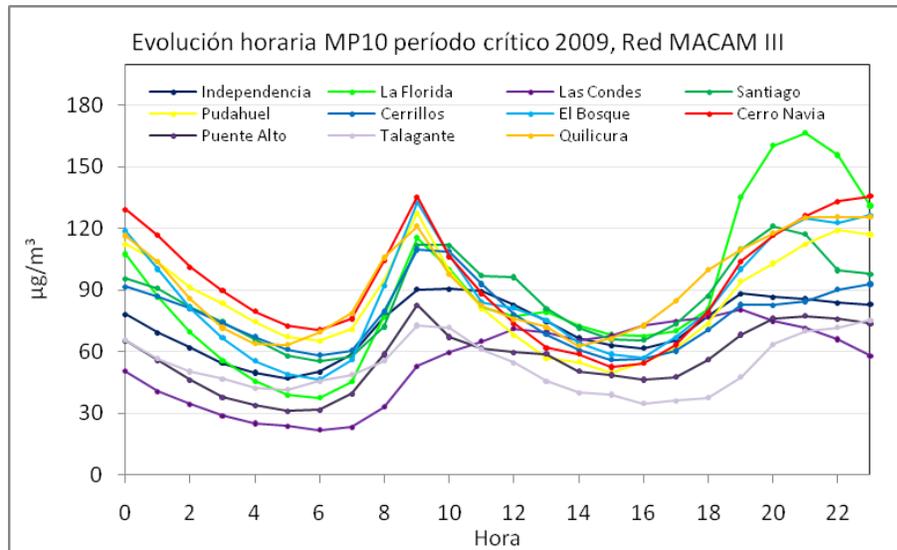


Figura 5.2: Concentraciones horarias promedio para el periodo crítico del año 2009 de las estaciones de la Red MACAM III

las concentraciones entre las 9 y las 10 de la mañana es a disminuir o mantenerse generalmente. Sin embargo, es una medida que podría no ser de gran utilidad en la predicción de las concentraciones para el día siguiente porque representa un cambio del día actual que podría no estar relacionado con los cambios en las concentraciones esperados para el día siguiente, pero se utiliza porque no se dispone de otra medida observada similar.

En la Fig. 5.2 se muestra el comportamiento horario de concentraciones promedio de MP10 para el año 2009 en las 11 estaciones de la Red MACAM III. Se observa que las concentraciones cambian hora a hora, siendo mayores en horas de la noche (20 a 0 horas) y de la mañana (7 a 10 horas) presentando marcados peaks a las 9 de la mañana en todas las estaciones, excepto en Las Condes donde se produce cerca de las 12 del día; y en la tarde cerca de las 19 horas en Las Condes, El Bosque e Independencia, a diferencia del gran peak de 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se produce a las 21

horas en La Florida. Estos peaks están relacionados con el tráfico vehicular debido a los horarios de la jornada laboral.

Es de interés recalcar que DIFF es la única variable que es pronosticada y por lo tanto, se estima que puede tener alto peso en la predicción, además de su marcada relación con las concentraciones y su bajo error de estimación, como se observó en la sección 3.1.7, página 27.

Las variables relacionadas con el cambio de emisiones esperadas para el día siguiente, se muestran en las siguientes secciones.

5.3.1. Modelo CONAMA98 para la caracterización de las emisiones por día de la semana

La variable $emis_{day}$ del modelo CONAMA98 [2], es utilizada como un factor de cambio de emisiones esperadas para el día siguiente en las estaciones de monitoreo, por día de la semana, según la ocurrencia de días feriados.

Esta variable fue empleada como complemento para la aplicación de la metodología de J. Cassmassi para el pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10, y será utilizada nuevamente para el desarrollo de los 3 modelos para las estaciones nuevas.

Una de las falencias de la aplicación de esta variable es que no considera que los índices de emisiones pueden variar de una estación a otra, sino que utiliza el mismo valor para todas.

Al momento de su aplicación el año 1998, era utilizada uniformemente para todas las estaciones, sin considerar tal como se muestra en Apéndice C que las concentraciones de MP10 no siguen un patrón uniforme en todas las estaciones y que sufren variaciones dependiendo del lugar donde se mida.

Como la variable $emis_{day}$ no corrige las variaciones de emisiones correspondientes a cada estación de monitoreo (porque fue determinada para una estación específica), se estableció que su aplicación podría resultar más apropiada si fuese multiplicada por las concentraciones de MP10 de cada estación, obteniendo una variable relativa al cambio esperado en las emisiones en cada estación de monitoreo.

El modelo de CONAMA supera parcialmente esta limitación, multiplicando en algunas estaciones (Parque O'Higgins y Cerrillos) la concentración de 24 horas de MP10 a las 10 a.m. de cada sitio específico por el porcentaje de cambio de las concentraciones de MP10 esperado.

La formulación del modelo de CONAMA para los términos de corrección por día de la semana, definidos como $EMIS - 1$ y $EMIS - 2_{day}$ (por simplicidad $EMIS - 2$) se muestran en la Ec.5.3 y Ec.5.4.

$$EMIS - 1_j = MP10AM_j * EMIS - 2_{day} \quad (5.3)$$

“j” representa a cada estación y “day” representa a día de la semana, donde

$$EMIS - 2_{day} = (1 + emis_{day}/100) \quad (5.4)$$

Los valores calculados para $emis_{day}$ [2] se muestran en la Tabla 5.4.

Ejemplos de la aplicación de los índices $emis_{day}$ según la información de la Tabla 5.4, es la siguiente:

- i) Si el día de la semana es viernes y no es feriado (0), y si el día siguiente,

sábado tampoco es feriado (0), entonces el cambio en la emisión esperada de viernes a sábado es -3.

ii) Feriado-feriado: si hoy es domingo es feriado (se cumple 0 y 1), y si mañana lunes es feriado (se cumple 2 y 3), entonces el cambio en la emisión esperada de domingo a lunes es 0.

iii) Feriado-no feriado: si hoy es domingo es feriado (se cumple 0 y 1), y si mañana lunes no es feriado (se cumple 0), entonces el cambio en la emisión esperada de domingo a lunes es 26.

iv) No feriado-feriado: si hoy es lunes y no es feriado (se cumple 0), y si mañana martes es feriado (se cumple 2), entonces el cambio en la emisión esperada de lunes a martes es -26.

Tabla 5.4: Índice de emisiones CONAMA98

Índice día feriado	0	1	2	3
Día (hoy)	Día normal	Feriado hoy	Feriado mañana	Feriado hoy y mañana
Lunes	3	26	-26	0
Martes	3	26	-26	0
Miércoles	3	26	-26	0
Jueves	3	26	-26	0
Viernes	-3	23	-26	0
Sábado	-26	0	-26	0
Domingo	26	26	0	0

De esta forma, se construyeron las bases de datos para las variables $EMIS - 1$ y $EMIS - 2$, multiplicando esta última por las concentraciones de 24 horas a las 10 a.m. para cada día del periodo crítico.

5.3.2. Análisis de cambio de emisiones por día de la semana, año 2009

Este análisis fue propuesto por J. Cassmassi, para diferenciar los niveles de concentraciones esperados para el día siguiente a partir de los cambios de concentraciones observados en cada estación por día de la semana.

De las figuras del Apéndice C se observa que existe gran variabilidad en cuanto al cambio de concentraciones según día de la semana para cada estación.

En promedio para las concentraciones máximas de 24 horas los mayores valores se registran los días martes y viernes para todas las estaciones, y las menores el lunes y domingo. Mientras que para la concentración de 24 horas de las 10 de la mañana, las mayores se registran viernes y martes, respectivamente, y las menores los lunes y domingo, respectivamente.

Tabla 5.5: Promedio de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana en cada estación de monitoreo, año 2009

Día	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	Prom
Lu	81,7	99,5	61,3	93,2	102,9	89,4	98,5	110,6	64,8	64,7	99,5	87,8
Ma	92,8	109,0	66,0	112,1	113,5	103,9	109,6	123,4	70,4	74,0	122,4	99,7
Mi	85,7	106,8	64,1	107,0	103,0	93,5	99,9	111,7	66,2	66,2	118,2	92,9
Ju	94,7	113,9	68,6	110,3	110,9	97,9	111,5	123,7	70,1	64,1	120,0	98,7
Vi	95,4	111,9	70,1	113,6	110,7	100,4	112,1	121,1	70,5	68,6	118,8	99,4
Sa	86,8	104,6	65,3	103,8	107,0	95,5	105,7	120,0	66,7	63,7	100,7	93,9
Do	72,1	97,8	57,9	92,1	106,6	87,4	97,5	116,9	60,3	63,5	100,7	86,6

Por otra parte, la mayor variación de un día para otro se produce en Quilicura de lunes a martes con un 23 % de incremento, mientras que la menor se produce en La Florida de martes a miércoles con una disminución del 2 % para las concentraciones máximas de 24 horas.

En las Tablas 5.5 y 5.6 se muestran los promedios y porcentajes de cambio de un

Tabla 5.6: Porcentaje de cambio en las concentraciones en un día ($CP24 - 1D_{d'ia}$) en cada estación de monitoreo

Días	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	Prom
Do-Lu	13,4	1,8	6,0	1,2	-3,5	2,3	1,1	-5,4	7,5	1,8	-1,2	2,3
Lu-Ma	13,6	9,5	7,6	20,3	10,3	16,2	11,2	11,5	8,6	14,5	23,0	13,3
Ma-Mi	-7,6	-2,0	-2,8	-4,6	-9,2	-10,0	-8,9	-9,5	-6,0	-10,6	-3,5	-6,8
Mi-Ju	10,5	6,6	7,0	3,1	7,6	4,7	11,6	10,7	5,9	-3,1	1,5	6,0
Ju-Vi	0,7	-1,7	2,3	3,0	-0,1	2,6	0,5	-2,1	0,6	7,0	-1,0	1,1
Vi-Sa	-9,0	-6,5	-6,9	-8,6	-3,3	-4,9	-5,7	-1,0	-5,5	-7,2	-4,1	-5,7
Sa-Do	-16,9	-6,6	-11,4	-11,3	-0,4	-8,4	-7,8	-2,5	-9,6	-0,3	-11,6	-7,9

Tabla 5.7: Promedio de los valores diarios de las 10 a.m. de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana en cada estación de monitoreo, año 2009

Día	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	Prom
Lu	58,6	75,0	46,0	71,4	72,0	64,1	73,2	75,0	49,7	50,2	74,9	64,6
Ma	81,4	93,6	52,1	91,1	100,0	91,8	93,2	109,9	62,9	64,9	103,0	85,8
Mi	74,6	92,2	62,5	93,5	82,9	77,1	83,4	89,0	56,2	52,7	100,7	78,6
Ju	83,2	98,8	59,1	96,1	93,6	84,7	95,4	106,2	62,4	57,5	103,6	85,5
Vi	86,0	102,1	63,1	99,5	94,7	86,9	100,3	102,5	64,2	56,6	102,9	87,2
Sa	78,7	92,5	58,1	90,9	90,5	81,6	93,0	101,6	58,2	53,9	100,0	81,7
Do	64,0	88,0	52,5	81,2	90,2	77,1	85,4	99,7	53,2	53,2	85,9	75,5

día para otro, de las concentraciones máximas diarias de 24 horas de MP10 para las 11 estaciones por día de la semana, respectivamente. Mientras que en las Tablas 5.7 y 5.8 se muestran los promedios y porcentajes de cambio de un día para otro, del valor 10 a.m. de las concentraciones de 24 horas de MP10 ($CP10 - 1D_{d'ia}$) para las 11 estaciones por día de la semana, respectivamente. La información de estas tablas ha sido construida en base a datos de las figuras del Apéndice C.

A partir del cálculo del promedio de las concentraciones de 24 horas de MP10 de las 10 de la mañana por día de la semana para el año 2009, se determinó el porcentaje de cambio de las concentraciones esperado del día actual con respecto al día siguiente. De esta forma, se construyó la variable $C10-1D$, cuya definición se muestra en la Ec. 5.5.

La variable $C10-1D$ es considera como la concentración de 24 horas de MP10 es-

Tabla 5.8: Porcentaje de cambio en las concentraciones en un día ($CP10 - 1D_{d'ia}$) en cada estación de monitoreo

Días	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	Prom
Do-Lu	-8,4	-14,8	-12,3	-12,0	-20,2	-16,9	-14,3	-24,8	-6,6	-5,7	-12,8	-13,5
Lu-Ma	38,9	24,7	13,3	27,6	38,9	43,1	27,3	46,6	26,5	29,2	37,6	32,2
Ma-Mi	-8,4	-1,5	19,9	2,5	-17,1	-16,0	-10,5	-19,0	-10,5	-18,7	-2,2	-7,4
Mi-Ju	11,6	7,1	-5,3	2,9	12,9	9,9	14,4	19,4	10,9	9,0	2,9	8,7
Ju-Vi	3,4	3,4	6,6	3,5	1,2	2,6	5,1	-3,5	3,0	-1,5	-0,7	2,1
Vi-Sa	-8,4	-9,5	-7,8	-8,6	-4,4	-6,1	-7,3	-0,9	-9,4	-4,9	-2,9	-6,4
Sa-Do	-18,7	-4,8	-9,8	-10,7	-0,4	-5,5	-8,2	-1,8	-8,6	-1,2	-14,1	-7,6

peradas a las 10 a.m. del día siguiente a partir del CICLO SEMANAL de la estación. Esta variable representa una caracterización alternativa al modelo de CONAMA para el cambio de las concentraciones de MP10 por día de la semana.

$$C10 - 1D_j = (1 + CP10 - 1D_{d'ia}/100) * MP10AM_j \quad (5.5)$$

5.3.3. Resumen de variables predictoras utilizadas en el análisis de regresión lineal múltiple

En la Tabla 5.13, se muestra el resumen de las variables que serán utilizadas para desarrollar los algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10, para las estaciones de Puente Alto (S), Talagante (T) y Quilicura (V).

Para que la aplicación de regresión lineal múltiple arroje valores representativos de lo que se quiere predecir, las variables independientes deben presentar una baja o nula correlación.

La correlación entre las variables predictoras de las estaciones de Puente Alto, Talagante y Quilicura, se muestra en las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12, respectivamente.

Tabla 5.9: Resumen y definición de las variables utilizadas para desarrollar los algoritmos de pronóstico

Variable	Unidad	Descripción
DIFF	N/A	Diferencia del nivel de PMCA esperado para el día siguiente y observado en el día actual
TEND	N/A	Tendencia de una hora de la concentración de 24 horas de MP10 (diferencia entre 10 a.m. y 9 a.m. del día actual) Si es 0 o positiva se asigna valor 1, si es negativa se asigna valor 0
MP10AM	$\mu g/m^3$	Valor a las 10 a.m. de la concentración de 24 horas día actual
C10-1D	$\mu g/m^3$	Concentración de 24 horas de MP10 esperada a las 10 a.m. del día siguiente a partir del CICLO SEMANAL de la estación) $C10 - 1D_j = (1 + CP10 - 1D_{dia}/100) * MP10AM_j$
EMIS-1	$\mu g/m^3$	Índice de emisiones del modelo CONAMA98 $EMIS - 1_j = MP10AM_j * EMIS - 2_{day}$
EMIS-2	N/A	Índice feriado-no feriado del modelo CONAMA98 $EMIS - 2_{day} = (1 + emis_{day}/100)$

Tabla 5.10: Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Puente Alto, 2009

Variable	Máx de S	DIFF	TEND	MP10AM	C10-1D	EMIS1	EMIS2
Máx de S	1						
DIFF	-0,36	1					
TEND	0,15	-0,26	1				
MP10AM	0,54	-0,21	-0,08	1			
C10-1D	0,58	-0,21	-0,04	0,94	1		
EMIS1	0,15	0,00	0,06	0,13	0,24	1	
EMIS2	0,06	0,03	0,08	-0,08	0,05	0,93	1

De las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12 se observa que la correlación más alta del valor máximo de concentración de 24 horas (Máx de S, Máx de T y Máx de V para Puente Alto, Talagante y Quilicura, respectivamente) para todas las estaciones, se genera con $C10 - 1D$ de manera positiva, seguida por MP10AM de forma positiva, y con DIFF de manera negativa. La correlación negativa con DIFF tiene sentido puesto que cuando DIFF es positivo, las concentraciones deben disminuir y viceversa, esto se genera porque a mayor DIFF las condiciones meteorológicas mejoran y a menor DIFF empeoran.

Por otra parte, se observa que la correlación entre las variables relacionadas con

Tabla 5.11: Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Talagante, 2009

Variable	Máx de T	DIFF	TEND	MP10AM	C10-1D	EMIS1	EMIS2
Máx de T	1						
DIFF	-0,35	1					
TEND	0,13	-0,05	1				
MP10AM	0,59	-0,33	0,00	1			
C10-1D	0,61	-0,31	-0,02	0,95	1		
EMIS1	0,16	0,00	0,06	0,23	0,24	1	
EMIS2	0,00	0,03	0,07	-0,01	0,02	0,87	1

Tabla 5.12: Correlación entre las variables utilizadas en los modelos para la estación Quilicura, 2009

Variable	Máx de V	DIFF	TEND	MP10AM	C10-1D	EMIS1	EMIS2
Máx de V	1						
DIFF	-0,42	1					
TEND	0,14	-0,18	1				
MP10AM	0,59	-0,36	0,04	1			
C10-1D	0,63	-0,37	0,12	0,95	1		
EMIS1	0,15	0,00	0,09	0,10	0,21	1	
EMIS2	0,04	0,03	0,07	-0,09	0,01	0,90	1

Tabla 5.13: Variables predictoras utilizadas para cada modelo.

Algoritmos de cálculo para cada estación	
Regresión lineal múltiple M1	DIFF - TEND - MP10AM
Regresión lineal múltiple M2	DIFF - C10-1D - TEND
Regresión lineal múltiple M3	DIFF - EMIS1 - TEND
Regresión lineal múltiple M4	DIFF - EMIS2 - TEND - MP10AM
Regresión lineal múltiple M5	C10-1D - TEND

el cambio esperado en las emisiones para el día siguiente ($C10 - 1D$ y $EMIS - 1/EMIS - 2$) es baja para las 3 estaciones, la variable $TEND$ no correlaciona con ninguna de las demás variables y $EMIS - 2$ presenta la más baja correlación con la variable a predecir.

Se aplicará análisis de regresión lineal múltiple a cada paquete de variables predictoras seleccionadas, con un intervalo de confianza del 95 %, conformando cada algoritmo de cálculo con una combinación de estas variables. Estas variables se muestran en la Tabla 5.13.

Para diferenciar la aplicación de los paquetes de variables a cada estación se utilizará la siguiente nomenclatura para cada estación: letra inicial de la estación, letra código de la estación, versión del modelo. Así por ejemplo, para la estación de Talagante la nomenclatura será TTM4, cuando se utilice el modelo M4.

Para la aplicación de la metodología de pronóstico se tuvo especial cuidado en realizar el cálculo de la regresión lineal múltiple a cada paquete de variables, considerando que la variable a predecir, por ejemplo la $[MP10_{m'ax,24horas}]$ del 02 de abril, corresponde a la variable dependiente, y que las variables independientes requeridas para el cálculo correspondían a las variables del día anterior, es decir, $TEND$, $DIFF$, $EMIS - 1$, $EMIS - 2$ y $C10 - 1D$ del 01 de abril.

Si no se toma en cuenta esta consideración se puede generar un gran error en la

predicción, por ejemplo, al calcular la regresión entre variables correspondientes al mismo día.

5.4. Metodología de evaluación de los algoritmos

La confiabilidad del pronóstico, según el Secreto Supremo 59/1998, corresponde al porcentaje de días dentro del periodo de validación¹ en que en una estación monitora con representatividad poblacional (EMRP), el nivel constatado (medido) para ese día coincide con el nivel pronosticado para ese día (Ej. se pronosticó alerta y se observó alerta para el día 10 de mayo de 2010).

La normativa establece que la metodología de pronóstico debe entregar una confiabilidad en el periodo de validación, que sea superior al 65 % por estación monitora.

La confiabilidad del pronóstico en una estación determinada, se calcula como el total de pronósticos de las concentraciones umbrales de MP10 realizadas correctamente dividido por el número total de predicciones realizadas (correctas e incorrectas).

Los valores umbrales usados en los cálculos de los pronósticos, son: Nivel 0 (sin episodio): 0-194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Nivel 1 (Alerta): 195-239 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Nivel 2 (Preemergencia): 240-330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Nivel 3 (Emergencia): 330-superior $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Según J. Cassmassi [29] la evaluación del modelo debe responder a varios niveles de desempeño. Primero, la evaluación estadística debe incluir la confiabilidad del pronóstico en los umbrales establecidos, así como el error medio absoluto para el pronóstico. El modelo debe ser capaz de predecir dentro de un rango de concentraciones definido de lo que se observa y una confiabilidad similar en días en que se

¹Periodo de validación es el conjunto de días usado para evaluar la confiabilidad del pronóstico. Este periodo debe corresponder al menos al mismo conjunto de días del año para el que fue concebido el método de pronóstico. En este periodo no se puede incluir información distinta de aquella con la que se construyó la aplicación de la metodología de pronóstico, de acuerdo a lo establecido en la normativa.

observan cambios significativos en las concentraciones diarias de MP10. El modelo debe ser evaluado para el desempeño de sus predicciones en las concentraciones umbrales que requieren la implementación de acciones de reducción de emisiones.

Un segundo nivel de evaluación del desempeño o rendimiento implica la generación de gráficos de dispersión de la predicción del modelo versus las concentraciones observadas, con el objeto de ilustrar la tendencia del modelo (en qué rangos predice bien y qué rangos predice mal).

Por otra parte, es de gran utilidad la realización de gráficos de series de tiempo, debido a que destacan la tendencia de los pronósticos de retrasar o anteceder observaciones. En cualquier caso, la inspección visual de los gráficos da confianza a la aceptación del modelo.

El último método de evaluación implica la formulación de una metodología estadística que permita determinar el comportamiento del modelo en días con niveles altos de contaminación y días con cambios importantes en las condiciones de contaminación, que usualmente corresponden a casos con desviaciones significativas de los modelos de pronóstico.

J. Cassmassi [29] propone una evaluación de los modelos realizados con cada paquete de variables, utilizando la Ec. 5.6. Donde propone que la puntuación (score) de cada modelo considere positivamente los aciertos del modelo bajo ciertas condiciones y negativo el error absoluto.

$$Score = PA - E + PC20 + CPC20 + AA \quad (5.6)$$

Donde

i) PA: Es el porcentaje de acierto de los pronósticos realizados por cada modelo,

obtenido desde una matriz de contingencia (Tabla 5.14), donde se utilizan todos los niveles umbrales de concentración máxima de 24 horas de MP10 para el análisis.

$$PA = \frac{n1 + n6 + n11 + n16}{\sum_{i=1}^{16} n_i} \quad (5.7)$$

ii) E: Es el error medio absoluto de los pronósticos realizados.

$$E = |\text{pronosticado} - \text{observado}| \quad (5.8)$$

iii) PC20: Es el porcentaje de casos con pronóstico en el rango $\pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto de lo observado.

El error medio absoluto, junto con el porcentaje de predicciones (PC20) $\pm \mu\text{g}/\text{m}^3$ de lo observado definen la buena calidad del ajuste de la predicción, ya que son indicadores que permiten conocer cuán cercanos son los pronósticos realizados con respecto a las observaciones.

iv) CPC20: Es el porcentaje de casos con pronóstico en el rango de predicción $\pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a lo observado en días en que las concentraciones presentan un cambio de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o más con respecto a la concentración entre el día actual (pronóstico) y el día siguiente (constatación del valor pronosticado). Prueba la sensibilidad del modelo para pronosticar en un cambio de tendencia de las concentraciones observadas, y es útil para determinar si el modelo de pronóstico se retrasa o adelanta la tendencia observada.

v) AA: Es el porcentaje de acierto de los pronósticos de los Niveles 2 y 3, cuando se deben implementar medidas de reducción de emisiones para no llegar a los niveles de

emergencia. De esta forma, considera como un acierto además del correcto pronóstico de preemergencia o emergencia, el pronóstico de preemergencia cuando se observa una emergencia y pronóstico de emergencia cuando se observa preemergencia, debido a que las acciones de reducción de emisiones de MP10 generarían una disminución en las condiciones de concentraciones para las cuales fue realizado el pronóstico.

$$AA = \frac{n11 + n12 + n15 + n16}{n3 + n4 + n7 + n8 + n9 + n10 + n11 + n12 + n13 + n14 + n15 + n16} \quad (5.9)$$

La puntuación máxima de esta evaluación es 400, considerando $E = 0$ y $PA = PC20 = CPC20 = AA = 100$. Por lo tanto, para determinar qué modelo será el mejor evaluado puede se calcular el indicador $Puntuacion/400$, y el algoritmo con el valor más alto será el mejor evaluado (rankeado). También bastaría con observar el modelo que reciba la puntuación más alta.

Adicionalmente CENMA, utiliza otros dos términos que permiten evaluar el acierto del modelo en días de episodio. En particular para la estación de Quilicura donde se observaron 7 y 2 alertas para los años 2009 y 2010, respectivamente, el parámetro AA no es de utilidad puesto que sólo considera el acierto en episodios de Nivel 2 y 3 (preemergencia y emergencia) y no del Nivel 1 (alerta). Los otros dos parámetros son $AA1$ y $APron$.

$AA1$: Es el porcentaje de acierto del valor pronosticado con respecto al número total de observaciones de alguno de los niveles umbrales que definen situaciones de emergencia ambiental (Nivel 1 alerta, Nivel 2 preemergencia o Nivel 3 emergencia), tomados desde una matriz de contingencia.

$$AA1 = \frac{n6}{n2 + n6 + n10 + n14} \quad (5.10)$$

APron: Es el porcentaje de acierto del valor pronosticado con respecto al número total de pronósticos de alguno de los niveles umbrales que definen situaciones de emergencia ambiental (Nivel 1 alerta, Nivel 2 preemergencia o Nivel 3 emergencia).

$$APron = \frac{n6}{n5 + n6 + n7 + n8} \quad (5.11)$$

Se debe hacer notar que para las estaciones de Puente Alto y Talagante los parámetros AA , $AA1$ y $APron$ no arrojan información acerca del acierto del pronóstico, porque en ellas no se registró ninguno de los niveles de emergencia para el periodo estudiado. Sin embargo, sí serán de utilidad para la estación de Quilicura, donde se registraron niveles de alerta para los años 2009 y 2010.

Por lo anterior, a diferencia del cálculo de puntuación para cada algoritmo realizado por J. Cassmassi, en este caso se utilizará la Ec. 5.12

$$Score = PA-E + PC20 + CPC20 + AA1 + APron \quad (5.12)$$

En la Tabla 5.14 se muestra una matriz de contingencia que permite calcular los parámetros AA , $AA1$ y $APron$. Los distintos valores de n ($n1$ hasta $n16$) representan la ocurrencia de aciertos y no aciertos del respectivo algoritmo de cálculo, por ejemplo $n1$ corresponde al número de pronósticos del Nivel 0, que fueron constatados

mediante una observación en ese mismo nivel (acierto). Así mismo, n_2 corresponde al número de pronósticos realizados en el Nivel 0 cuya observación correspondió a un Nivel 1, es decir, una subestimación del valor (no acierto).

Tabla 5.14: Matriz de contingencia para la evaluación de los algoritmos de cálculo

Predicción \ Observación	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	<195 $\mu g/m^3$	$195-239$ $\mu g/m^3$	$240-329$ $\mu g/m^3$	>330 $\mu g/m^3$
Nivel 0 <195 $\mu g/m^3$	n1	n2	n3	n4
Nivel 1 $195-239$ $\mu g/m^3$	n5	n6	n7	n8
Nivel 2 $240-329$ $\mu g/m^3$	n9	n10	n11	n12
Nivel 3 >330 $\mu g/m^3$	n13	n14	n15	n16

Capítulo 6

Resultados obtenidos de la aplicación del Modelo Cassmassi a las nuevas estaciones de la Red MACAM III

Como resultado de la aplicación de la metodología del modelo Cassmassi, se obtuvo los 5 algoritmos de cálculo para cada una de las estaciones de monitoreo de Puente Alto, Talagante y Quilicura. En las secciones siguientes se muestran los coeficientes de las variables independientes obtenidos con la técnica de regresión lineal múltiple; la evaluación de los algoritmos de cálculo para los años 2009 y 2010, de acuerdo a la metodología utilizada por J. Cassmassi y CENMA; las series de tiempo correspondientes a la comparación entre los valores pronosticados y observados en cada estación los años 2009 y 2010; y las gráficas de dispersión de los valores medidos versus los valores pronosticados por los algoritmos de cálculo para cada estación.

6.1. Resultados de la aplicación de regresión lineal múltiple a los paquetes de variables, año 2009

A partir de los gráficos observado v/s pronosticado del Apéndice D se observa que bajo la línea diagonal se muestran los valores sobrepronosticados, mientras que por encima se muestran los valores subpronosticados.

Tabla 6.1: Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Puente Alto (Desarrollados con datos de 2009)

Modelo	Intercepto	Coeficientes					
	$\mu g/m^3$	DIFF	EMIS-1	EMIS-2	C10-1D	TEND	MP10AM
PSM1	31,4	-1,33				7,9	0,53
PSM2	30,9	-1,1			0,55	7,0	
PSM3	63,2	-4,2	0,05			4,5	
PSM4	30,5	-1,5		2,0		7,4	0,54
PSM5	30,0				0,56	7,4	
Datos estadísticos							
Modelo	Error típico	R	R ²	N			
	$\mu g/m^3$						
PSM1	17,3	0,58	0,34	150			
PSM2	16,9	0,61	0,37	150			
PSM3	20,4	0,28	0,08	150			
PSM4	17,3	0,59	0,35	150			
PSM5	16,9	0,61	0,37	150			

La aplicación de regresión lineal múltiple a las bases de datos del año 2009, dio como resultado la obtención de 5 algoritmos (M1, M2, M3, M4 y M5) para cada estación de monitoreo, que permitirán realizar los pronósticos de las concentraciones máximas de MP10 para el año 2009 y 2010.

Los coeficientes de las variables independientes de la regresión, se muestran en las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3, correspondientes a Puente Alto (S), Talagante (T) y Quilicura (V), respectivamente. De estas tablas se extrae que el modelo M3 para todas las estaciones genera los más bajos ajustes lineales ($R^2 = 0,08$; 0,04 y 0,21; respectiva-

Tabla 6.2: Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Talagante (Desarrollados con datos de 2009)

Modelo	Intercepto	Coeficientes					
	$\mu g/m^3$	DIFF	EMIS-1	EMIS-2	C10-1D	TEND	MP10AM
TTM1	29,2	2,0				6,6	0,59
TTM2	27,4	2,2			0,61	7,3	
TTM3	60,8	1,7	0,06			6,2	
TTM4	29,2	2,0		0,08		6,6	0,59
TTM5	27,0				0,61	8,1	
Datos estadísticos							
Modelo	Error típico	R	R^2	N			
	$\mu g/m^3$						
TTM1	21,8	0,61	0,37	150			
TTM2	21,2	0,63	0,40	150			
TTM3	26,9	0,20	0,04	150			
TTM4	21,9	0,61	0,37	150			
TTM5	21,3	0,63	0,39	150			

mente para S, T y V), lo que se observa claramente en los gráficos de dispersión del Apéndice D (Fig. *D,1(b)*, *D,3(b)* y *D,5(c)*) y de series de tiempo de valores observados versus valores pronosticados del Apéndice E (Fig. *E,1(b)*, *E,4(b)* y *E,7(c)*), respectivamente.

Entre los algoritmos M2 y M3 la única variable distinta es la relativa al cambio de emisiones (concentraciones) esperadas para el día siguiente, mientras que las demás (*TEND* y *DIFF*) se mantienen. En vista que el modelo M3 tiene los ajustes lineales más bajos para las 3 estaciones, se asume que la variable *EMIS-1* (presenta además la más baja ponderación) es la responsable, por lo que debería ser eliminada como variable predictora.

Entre los algoritmos M2 y M4, se observa una leve diferencia entre los valores de R^2 de 0,02; 0,03 y 0,03; respectivamente para S, T y V, aún cuando en todos los casos, el algoritmo M2 presenta un mejor ajuste ($R^2 = 0,37$ para Puente Alto; $R^2 = 0,40$ para Talagante; y $R^2 = 0,45$ para Quilicura), lo que se condice con el hecho de que la variable *C10-1D* ha sido actualizada para el año 2009, lo que genera

Tabla 6.3: Algoritmos de pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 para Quilicura (Desarrollados con datos de 2009)

Modelo	Intercepto	Coeficientes					
	$\mu g/m^3$	DIFF	EMIS-1	EMIS-2	C10-1D	TEND	MP10AM
QVM1	60,2	-10,6				6,9	0,51
QVM2	58,5	-9,9			0,55	2,9	
QVM3	108,3	-19,5	0,06			4,5	
QVM4	58,0	-10,7		4,1		6,3	0,52
QVM5	50,12				0,63	5,32	
Datos estadísticos							
Modelo	Error típico	R	R ²	N			
	$\mu g/m^3$						
QVM1	34,1	0,64	0,41	152			
QVM2	33,0	0,67	0,45	152			
QVM3	39,6	0,45	0,21	152			
QVM4	34,0	0,65	0,42	152			
QVM5	34,0	0,64	0,41	152			

una mejoría en la estimación.

Finalmente, de acuerdo a los mejores ajustes lineales, se seleccionan como mejores algoritmos predictores para el año 2009 a: PSM2 y PSM5, Puente Alto; TTM2 y TTM5 para Talagante; y QVM2 y QVM4 para Quilicura.

Se contrastarán estos resultados, con los resultados que entregue la evaluación propuesta por J. Cassmassi y CENMA.

6.2. Resultados de la aplicación y evaluación de los modelos para los años 2009 y 2010

Utilizando los coeficientes calculados con las bases de datos del año 2009 (Tablas 6.1, 6.2 y 6.3), se generaron los 5 algoritmos para cada estación. Posteriormente, éstos algoritmos se utilizaron para generar pronósticos con las bases de datos del año 2010, con el objeto de comparar los pronósticos obtenidos para el presente año con el modelo oficial Cassmassi y los algoritmos de las nuevas estaciones.

Los resultados de la evaluación de los algoritmos, de acuerdo a lo indicado en la Sección 5.4 para los años 2009 y 2010, se muestran en las Tablas 6.4, 6.5 y 6.6, respectivamente. En base a estas evaluaciones, se determinará cuáles son los algoritmos que generan mejores pronósticos de las máximas concentraciones de 24 horas, esperadas para el día siguiente.

En estas tablas se observa que para las estaciones de Puente Alto y Talagante, el acierto global (PA) de todos los modelos fue de 100 % para los años 2009 y 2010, es decir, que todos los valores pronosticados se encuentran en el nivel de observación. Sin embargo, la información de estas estaciones no es de gran utilidad para efectos de pronóstico de las concentraciones máximas de MP_{10} esperadas para el día siguiente, porque en ningún día de observación se registraron niveles de emergencia (1, 2 y 3). Por lo tanto, en estas 2 estaciones la diferencia en la puntuación (TOTAL) y su posición en la evaluación (RANK), estuvieron marcadas por el error medio absoluto (E) y por el porcentaje de pronósticos que estuvieron en el rango de $\pm 20 \mu g/m^3$ respecto de lo observado (PC_{20}), para Puente Alto; y además el porcentaje de casos en que se cumplió que el pronóstico coincidió con el rango de $\pm 20 \mu g/m^3$ respecto de lo observado, cuando se observó el día siguiente un cambio en las concentraciones de más de $40 \mu g/m^3$ (CPC_{20}), medida que da cuenta de la capacidad del algoritmo de pronosticar correctamente bajo un cambio importante en las condiciones para las que se realizó el pronóstico.

Los casos en que no se presenta la condición especificada por el parámetro de evaluación, se incluye una referencia N/A (No Aplica), como es el caso del evaluador $AA1$ y $APron$ para las estaciones de Puente Alto y Talagante, donde no es aplicable debido a que no se presentaron los niveles de emergencia.

En Quilicura, además de todos los evaluadores señalados anteriormente, se puede

Tabla 6.4: Evaluación (Score) modelos Puente Alto 2009 y 2010

Modelo	PA	E	PC20	CPC20	AA1	APron	TOTAL	RANK
Evaluación modelos 2009								
PSM1	100	13,1	76	0	N/A	N/A	162,9	3
PSM2	100	12,9	78,7	0	N/A	N/A	165,8	1
PSM3	100	15,4	72	0	N/A	N/A	156,6	5
PSM4	100	13,2	74,7	0	N/A	N/A	161,5	4
PSM5	100	12,9	78	0	N/A	N/A	165,1	2
Evaluación modelos 2010								
PSM1	100	17,5	65,8	N/A	N/A	N/A	148,3	4
PSM2	100	11,3	79,6	N/A	N/A	N/A	168,3	3
PSM3	100	19,8	57,9	N/A	N/A	N/A	138,1	5
PSM4	100	17,3	98,7	N/A	N/A	N/A	181,4	1
PSM5	100	11,4	80,3	N/A	N/A	N/A	168,9	2

Tabla 6.5: Evaluación (Score) modelos Talagante 2009 y 2010

Modelo	PA	E	PC20	CPC20	AA1	APron	TOTAL	RANK
Evaluación modelos 2009								
TTM1	100	17,0	66	50	N/A	N/A	199,0	3
TTM2	100	11,6	70	50	N/A	N/A	208,4	1
TTM3	100	21,3	56,7	25	N/A	N/A	160,4	5
TTM4	100	18,9	65,3	50	N/A	N/A	196,5	4
TTM5	100	16,9	68,7	50	N/A	N/A	201,8	2
Evaluación modelos 2010								
TTM1	100	14,7	72,3	33,3	N/A	N/A	191,3	5
TTM2	100	16,0	68	50	N/A	N/A	202,0	3
TTM3	100	16,8	66	83,3	N/A	N/A	232,6	1
TTM4	100	14,7	72,7	33,3	N/A	N/A	191,3	4
TTM5	100	15,9	68	50	N/A	N/A	202,1	2

aplicar *AA1* y *APron* porque se presentaron observaciones de alerta (Nivel 1), mostrando que el modelo M5 fue el mejor evaluado para el año 2009 por tener el más alto porcentaje de acierto de las alertas pronosticadas con respecto al total de pronósticos, lo que entrega información valiosa con respecto a que no basta con considerar el algoritmo con el mejor ajuste lineal (R^2).

La evaluación muestra que los modelos M2 y M4 son los mejor evaluados para Puente Alto el año 2009 y 2010 respectivamente; los modelos M2 y M3 para Talagante en 2009 y 2010; y en Quilicura lo fueron los modelos M5 y M1 para cada año.

Tabla 6.6: Evaluación (Score) modelos Quilicura 2009 y 2010

Modelo	PA	E	PC20	CPC20	AA1	APron	TOTAL	RANK
Evaluación modelos 2009								
QVM1	94,1	27,0	43,4	36,8	N/A	0	147,3	4
QVM2	94,7	25,8	45,4	36,8	100	11	262,2	2
QVM3	94,1	31,0	39,5	36,8	N/A	0	139,4	5
QVM4	94,1	27,0	44,1	36,8	N/A	0	148,0	3
QVM5	95,4	26,9	43,4	36,8	100	22	270,7	1
Evaluación modelos 2010								
QVM1	98,7	25,7	43,4	73,3	N/A	0	189,7	1
QVM2	98,7	25,3	45,4	42,7	N/A	0	161,5	2
QVM3	98,7	29,3	40,8	43,5	N/A	0	153,7	5
QVM4	98,7	25,2	43,4	37,5	N/A	0	154,4	4
QVM5	98,7	25,8	42,8	43,6	N/A	0	159,3	3

Esta evaluación presenta algunos errores, como se observa para Talagante para el año 2010, donde se muestra que el modelo mejor evaluado según este sistema es el M3, que como se vio anteriormente, presenta las menores correlaciones lineales con respecto a todos los demás modelos, y sólo genera los pronósticos en un rango acotado, como se muestra en la Fig.6.4(b). Sin embargo, esta mayor evaluación la obtuvo por tener el mayor porcentaje *CPC20* producido en coincidencia de que los cambios en las concentraciones de más de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se produjeron en el rango en que este modelo pronostica, y que no tiene relación con los niveles observados.

En las Fig. 6.1(a) y 6.1(b) se muestran los gráficos de dispersión de las concentraciones observadas versus las pronosticadas con el algoritmo PSM2 para el año 2009 y con PSM4 para el año 2010 para Puente Alto, en base a la evaluación mostrada en la Tabla 6.4. Se observa que los puntos se aproximan más a la recta ideal para el 2009, teniendo un mejor ajuste. Lo que se explica por la variabilidad de las condiciones entre un año y otro.

Las Fig. 6.2(a) y 6.2(b) muestran las series de tiempo de los valores observados y pronosticados para el mismo día obtenidos a partir de los algoritmos mejor evaluados

para cada año, PSM2 y PSM4, respectivamente. A simple vista, se observa que los pronósticos fueron más cercanos a los valores máximos observados para el año 2009 que es lo esperado para este modelo. Mientras que para el año 2010, los pronósticos acertaron mayormente a los valores mínimos observados, lo que no genera aportes en la predicción.

En las Fig. 6.3(a) y 6.3(b) se muestran los gráficos de dispersión de las concentraciones observadas versus las pronosticadas con el algoritmo TTM2 para el año 2009 y con TTM3 para el año 2010 para Talagante, en base a la evaluación mostrada en la Tabla 6.5. Se observa que los puntos se aproximan más a la recta ideal para el año 2009, teniendo un mayor ajuste. Mientras que el algoritmo seleccionado para el año 2010, basado sólo en la tabla de evaluación, muestra un bajo ajuste línea (sólo un 4% de los datos se pueden explicar con el algoritmo encontrado). Sin embargo, se consideró este algoritmo con el objeto de ilustrar que la forma de evaluación propuesta conduce a cometer errores, y que, por lo tanto, debe ser considerada como una herramienta complementaria.

Las Fig. 6.4(a) y 6.4(b) muestran las series de tiempo de los valores observados y pronosticados para el mismo día, obtenidos a partir de los algoritmos mejor evaluados para cada año, TTM2 y TTM3, respectivamente. Se observa que los pronósticos para el año 2009 se comportaron de forma distinta a lo largo del periodo de aplicación. En este sentido, los pronósticos fueron más cercanos a los valores máximos observados desde la mitad del periodo en adelante (aproximadamente desde el 15 de junio). Mientras que para el año 2010, los pronósticos se mantuvieron en torno a un valor de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se encuentra lejos de representar la realidad del periodo.

Adicionalmente, se atribuye a este comportamiento de los valores pronosticados, el gran porcentaje de aciertos obtenidos en el parámetro *CPC20* (83,3%), donde

gráficamente se observa que variaciones importantes en las concentraciones entre el día actual y el siguiente, están en el rango de los pronósticos realizados por este algoritmo.

A diferencia de las estaciones de Puente Alto y Talagante, los algoritmos para la estación de Quilicura muestran un comportamiento más uniforme entre los años 2009 y 2010. En las Fig. 6.5(a) y 6.5(b) se muestran los gráficos de dispersión de las concentraciones observadas versus las pronosticadas con el algoritmo QVM5 para el año 2009 y con QVM1 para el año 2010 para Quilicura, en base a la evaluación mostrada en la Tabla 6.6. Se observa que los puntos tienen una menor dispersión para el año 2010.

Adicionalmente, se observa que las concentraciones máximas de 24 horas de MP10 fueron más altas para el año 2009, superando los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 7 ocasiones, y la norma en 9 oportunidades. Mientras que para el año 2010 la norma fue superada sólo en 2 ocasiones, con valores de 197 y $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Las Fig. 6.6(a) y 6.6(b) muestran las series de tiempo de los valores observados y pronosticados para el mismo día obtenidos a partir de los algoritmos mejor evaluados para cada año, QVM5 y QVM1, respectivamente. Se observa que los pronósticos están adelantados o presentan un desfase con respecto a las observaciones, hecho no atribuible a posibles errores con respecto a la construcción de las bases de datos para correr los modelos, puesto que tal como se mencionó con anterioridad, los cálculos se realizaron con el cuidado de identificar los días correctos para hacer coincidir las variables de pronóstico con la variable observada (por ejemplo, todos los valores considerados para el pronóstico para el día siguiente, se realizaron con las variables del día anterior).

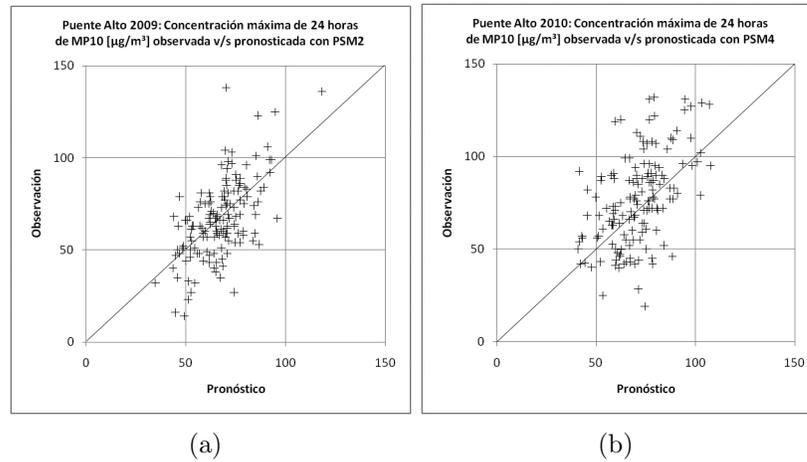


Figura 6.1: Concentración máxima de 24 horas de MP_{10} observada v/s pronosticada en Puente Alto 2009-2010

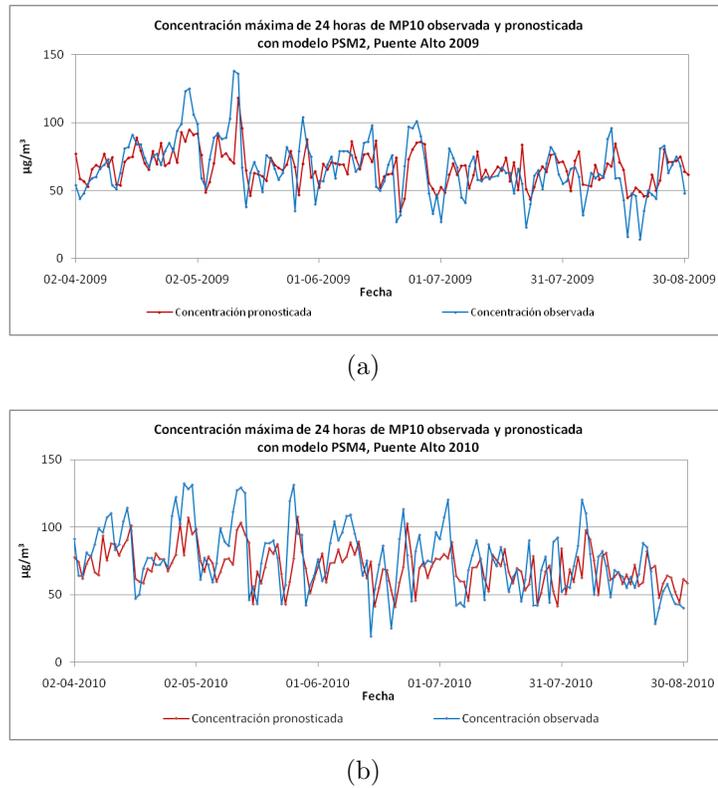


Figura 6.2: Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP_{10} diaria observada y pronosticada para Puente Alto 2009-2010

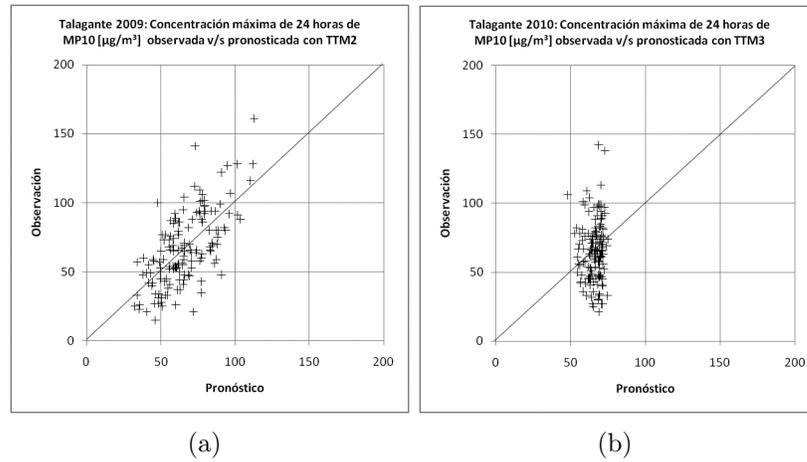


Figura 6.3: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2009-2010

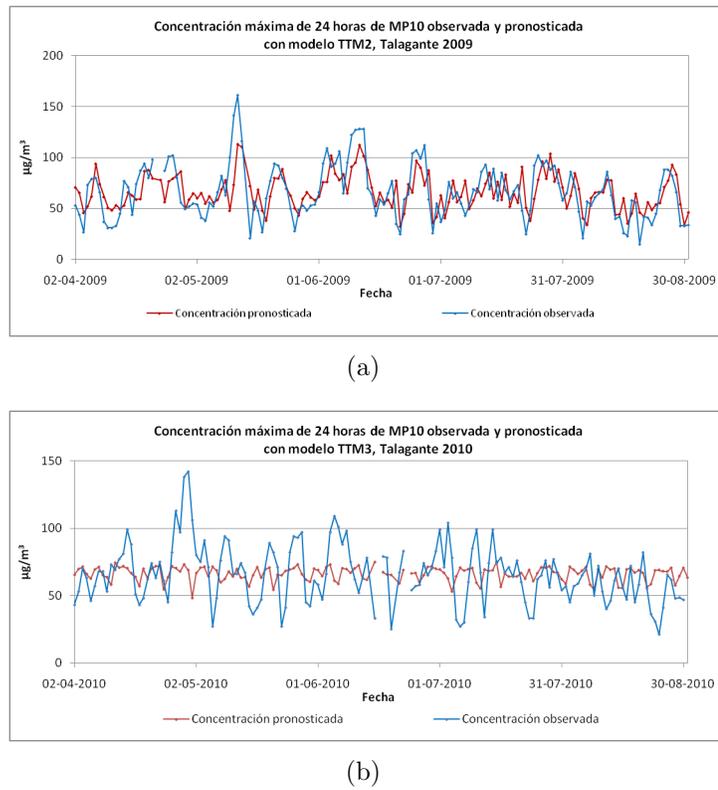


Figura 6.4: Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP10 diaria observada y pronosticada para Talagante

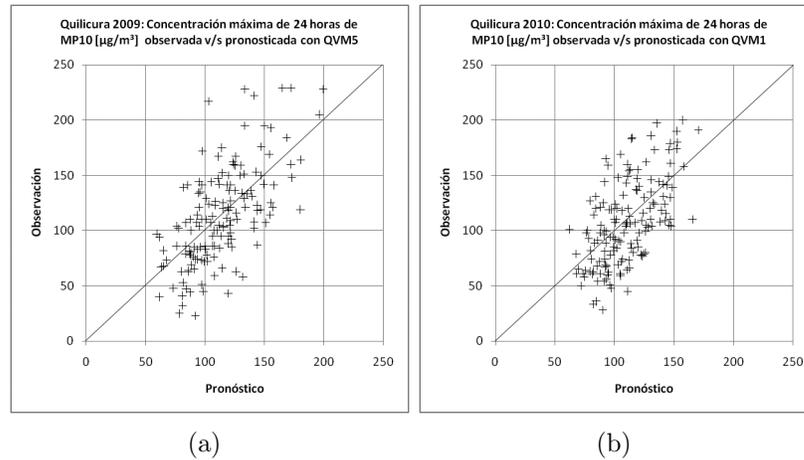


Figura 6.5: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2009-2010

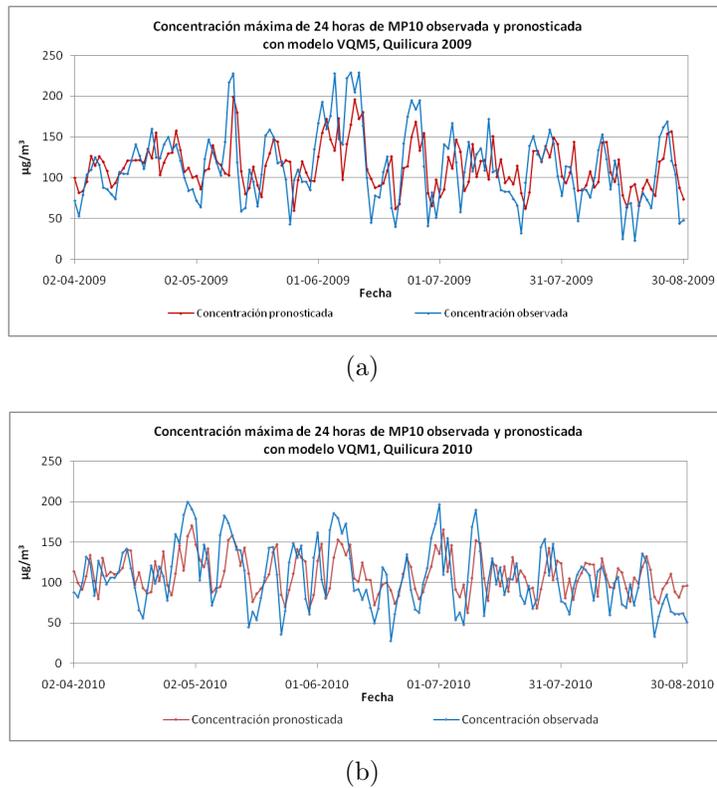


Figura 6.6: Series de tiempo de la concentración máxima de 24 horas de MP10 diaria observada y pronosticada para Quilicura

6.3. Resumen de ecuaciones del modelo Cassmassi año 2010

Las ecuaciones de pronóstico originales generadas por la aplicación del modelo Cassmassi, para las estaciones más antiguas de la Red MACAM III (Datos proporcionados por CONAMA RM) se muestran en la Tabla 6.7. Se observa que en 3 estaciones se utilizan algoritmos de cálculos que consideran sólo las variables utilizadas en este trabajo, ellas son las estaciones de La Florida (L), Independencia (F) y El Bosque (Q). Otras 2 estaciones, Cerrillos (P) y Santiago (N) utilizan el modelo CONAMA98, debido a que su evaluación de desempeño fue mejor que para otros algoritmos en 1999. Finalmente sólo 2 estaciones, Las Condes (M) y Pudahuel (O) consideran variables meteorológicas en el pronóstico, indicadas a continuación:

MI1: Potencial meteorológico de las 10 de la mañana siguiente

T: Temperatura al nivel de presión de 925 hPa a las 8 am día actual

W: Velocidad del viento a la altura de 850 hPa medida a las 8 am día actual

H: Diferencia de altura (500-1000 hPa) normalizada medida a las 8 am día actual

RH: Humedad relativa en 925 hPa a las 8 am

D: Cambio de la dirección del viento al nivel de presión de 925 hPa a las 8 am día actual

DH500: Diferencia entre la altura de 500 hPa entre el día actual y el día anterior a las 8 am

Tabla 6.7: Ecuaciones de pronóstico oficiales y desarrolladas para las nuevas estaciones de la Red MACAM III

Est.	Algoritmo de cálculo de las concentraciones máximas de 24 horas de MP10
F	$NC-B=60.7+17.7*DIFF-17.8*EMIS2+16.5*TEND+0.73*MP10AM$
L	$MPP-A=58.0+15.4*DIFF+0.31*(CP10-1D)+24.2*TEND+0.32*MP10AM$
M	$HNS24S=4.6+6.9*MI1-4.34*T-0.79*W+2.09*H-0.03*D-0.48*(CP10-1D)-0.45*RH$
N	$CONAMA\ 98=MP10AM*EMIS2+45*DIFF+22.5*TEND$
O	$HNS24S=-21.7+39.34*MI1+0.33*MP10AM+2.06*T+0.21*DH500$
P	$CONAMA\ 98=MP10AM*EMIS2+45*DIFF+22.5*TEND$
Q	$MPP-A = 52.9+12.8* DIFF+0.66*(CP10-1D)+20.3*TEND$
S	$PSM4 = 30,48-1,46*DIFF+7,43*TEND+0,54*MP10AM+2,03*EMIS2$
T	$TTM3 = 60,83+1,66*DIFF+6,17*TEND+0,062*EMIS1$
V	$QVM1 = 60,2-10,6*DIFF+6,9*TEND+0,51*MP10AM$

6.3.1. Análisis de umbral

El análisis de umbral se utiliza para conocer el número de días en que se exceden los niveles o umbrales que definen los episodios críticos en la R.M., para cada una de las estaciones.

En la Tabla de contingencia 6.8, se muestra la ocurrencia de los valores máximos de concentraciones de 24 horas de MP10 registrados diariamente en alguna de las estaciones de la Red MACAM III durante el 2010.

Se observa que los niveles de emergencia (1 y 2) se producen en las estaciones

de Cerro Navia, Pudahuel y Quilicura, constatando un total de 13 episodios críticos en el presente año, 11 alertas y 2 preemergencias. Mientras que los mayores valores diarios del Nivel 0 se producen en Cerro Navia y Quilicura, seguidos por La Florida y El Bosque.

Tabla 6.8: Número de días por estación en que se registraron los mayores valores diarios de concentración máxima de 24 horas de la Red MACAM, período crítico 2010

Estación	Nivel de umbral				
	Nivel 0 Bueno	Nivel 0 Regular	Nivel 1 Alerta	Nivel 2 Preemergencia	Nivel 3 Emergencia
Cerro Navia	41	12	8	1	0
Pudahuel	0	0	2	1	0
Quilicura	27	2	1	0	0
El Bosque	19	3	0	0	0
La Florida	22	2	0	0	0
Santiago	10	1	0	0	0
Cerrillos	1	0	0	0	0
Las Condes	0	0	0	0	0
Independencia	0	0	0	0	0
Talagante	0	0	0	0	0
Puente Alto	0	0	0	0	0
TOTAL	120	20	11	2	0
Días	153				

6.4. Comparación de los resultados obtenidos por los modelos de pronóstico oficial y desarrollado el año 2010

Como la evaluación de los algoritmos de pronóstico presenta algunas falencias de acuerdo a lo expuesto anteriormente, en la Tabla 6.9 se muestran los niveles de acierto

y no acierto a las condiciones observadas el año 2010 en la estación Quilicura, contrastando los pronósticos del modelo Cassmassi para cualquiera de las estaciones, con los algoritmos mejor evaluados para la estación de Quilicura del año 2010 (modelos M1, M2, M4 y M5).

El objetivo de esta comparación es determinar cuál algoritmo generó un mayor acierto para el año 2010, y cuya aplicación pueda ser realizada para el año 2011.

Debe mencionarse que el modelo Cassmassi considera como un acierto, un pronóstico realizado para una estación, pudiendo ser constatado en ella misma o en otra. Por ejemplo, si en la estación de El Bosque se pronostica un episodio para el día siguiente y no se observa en El Bosque, pero sí en Pudahuel, se considera como acierto global del modelo Cassmassi[44]. Por esta razón, se puede comparar el desempeño del modelo Cassmassi, con los 4 algoritmos mejor evaluados para Quilicura en el presente año.

Tabla 6.9: Comparación modelos Cassmassi y desarrollados para la estación de Quilicura 2010

Modelo \ Nivel	Bueno	Regular	Alerta
QVM1 - acierto	26	0	0 ($157\mu g/m^3$, regular)
QVM1 - no acierto	0	2	1
QVM2 - acierto	25	0	0 ($158\mu g/m^3$, regular)
QVM2 - no acierto	1	2	1
QVM4 - acierto	26	0	0 ($161\mu g/m^3$, regular)
QVM4 - no acierto	0	2	1
QVM5 - acierto	25	0	0($166\mu g/m^3$, regular)
QVM5 - no acierto	1	2	1
Cassmassi - acierto	14	1	0 ($240\mu g/m^3$, preemergencia)
Cassmassi - no acierto	12	1	1
Número de observaciones	26	2	1 ($211\mu g/m^3$)

Para el año 2010, en la estación de Quilicura se registraron 27 observaciones en el Nivel 0 bueno, 2 en el Nivel 0 regular, y 1 en el Nivel 1 alerta (se consideran 26

observaciones porque no se dispone del pronóstico para el primer día del periodo, 01 de abril).

Los resultados de la comparación, muestran que todos los algoritmos de la estación Quilicura aciertan en mayor grado al Nivel 0 bueno, en contraste con lo observado para el modelo Cassmassi, principalmente porque Quilicura registra valores mayores en ese rango con respecto a las demás estaciones.

Ninguno de los algoritmos de la estación Quilicura genera un pronóstico correcto del Nivel 0 regular y Nivel 1 alerta.

Finalmente, pese a que ninguno de los modelos fue capaz de pronosticar correctamente la alerta ocurrida en Quilicura (30 de abril), el modelo Cassmassi generó un sobrepronóstico de Nivel 2 Preemergencia, mientras que los demás modelos generaron un subpronóstico de Nivel 0 regular.

Por otra parte, en consideración con las estaciones Puente Alto y Talagante, según el Decreto Supremo 59/1998, la metodología de pronóstico de las concentraciones máximas de 24 horas durante el periodo crítico de cada año debe aplicarse a las estaciones monitoras clasificadas como EMRP que hayan alcanzado al menos alguno de los niveles de emergencia (1, 2 o 3), durante el periodo de generación de la información.

En este caso, el periodo corresponde al comprendido entre el 01 de abril y el 31 de agosto del año 2009, no registrando niveles de emergencia en las estaciones de Talagante y Puente Alto, siendo los valores anuales máximos registrados $166\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $138\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Adicionalmente, para el periodo crítico del año 2010, los valores máximos registrados correspondientes a $123\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Talagante y $142\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente Alto. De acuerdo a esta información, la aplicación de una metodología de pronóstico para

estas 2 estaciones de monitoreo no es necesaria, ya que en éstas no se han registrado niveles de concentraciones de MP10, que según la legislación Chilena ocasionen impactos negativos en la salud de las personas.

Capítulo 7

Conclusiones Generales

Los algoritmos de pronóstico desarrollados para las estaciones de Puente Alto, Talagante y Quilicura muestran buenos aciertos globales (PA), cercanos al 100 %, considerando el pronóstico de Nivel 0 - bueno.

Sin embargo, cuando se trata de pronosticar Niveles 1 de alerta, la situación es muy distinta, por ejemplo, en el año 2009 hubo un total de 9 alertas en la estación de Quilicura de las que sólo se pronosticó correctamente el 22 %, utilizando el mejor algoritmo evaluado. Mientras que del total de 2 alertas del año 2010, el mejor algoritmo evaluado generó subestimaciones (Nivel 0 regular).

Se concluye que las estaciones de Puente Alto y Talagante no generan mejoras en el sistema de pronóstico, tal como se esperaba debido a que las concentraciones máximas de 24 horas son bajas durante todo el periodo crítico.

De acuerdo a la metodología de evaluación de los algoritmos de cálculo para la estación Quilicura, se encontró que el mejor evaluado para el año 2010 es el QVM1 que utiliza como variables predictivas $DIFF$, $TEND$ y $MP10AM$. Mientras que, según la evaluación realizada, al comparar los valores pronosticados por los algoritmos QVM1 y QVM5, que utiliza como variables predictivas $C10-1D$ y $TEND$, éste

último, pese a registrar un menor acierto en Nivel 0 bueno, generó un pronóstico más cercano al único Nivel 1 de alerta registrado en la estación. Por esto, se considera que el mejor algoritmo de pronóstico para la estación Quilicura es el QVM5, ya que se acerca a los valores del rango en que se requiere la realización de un pronóstico, de acuerdo al escenario actual.

De acuerdo a los antecedentes recabados, se considera que podría ser de gran utilidad, tomar en cuenta sólo aquellas estaciones que hayan registrado la superación de los niveles de emergencia a la fecha (Pudahuel, Cerro Navia y Quilicura), ya que son éstas las que entregan información valiosa para el pronóstico de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 que generan riesgo para la población.

Referencias

- [1] *Atmósfera Meteorología Interactiva, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile* <http://www.atmosfera.cl>.
- [2] *Cáceres T. Jorge, (Primer) Modelo de Pronóstico para Santiago, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile 1997.*
- [3] *Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA)* www.cenma.cl.
- [4] *Centro Premio Nobel Mario Molina* <http://www.cmmolina.cl/>.
- [5] *Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)* www.conama.cl, .
- [6] *Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CONAMA RM)* <http://www.conama.cl/rm/>, .
- [7] *Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana CONAMA RM* <http://www.conama.cl/rm/568/article-1166.html>, .
- [8] *Decreto Supremo 112/2003 Establece norma primaria de calidad de aire para Ozono (O₃).* Ministerio Secretaría General de la Presidencia, .
- [9] *Decreto Supremo 131/1996 Declara zona saturada por ozono, material particulado respirable, partículas en suspensión y monóxido de carbono, y zona latente por dióxido de nitrógeno, al área que indica (Región Metropolitana).* Ministerio Secretaría General de la Presidencia; Comisión Nacional del Medio Ambiente.

-
- [10] *Decreto Supremo 138/2005 Establece obligación de declarar emisiones que indica.* Ministerio de Salud.
- [11] *Decreto Supremo 16/1998 Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana y sus modificaciones y reformulaciones establecidas en el D.S.N20/2001 y D.S. 58/2004 respectivamente.* Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- [12] *Decreto Supremo 59/1998 Establece norma de calidad para Material Particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia.* Ministerio Secretaría General de la Presidencia, .
- [13] *Decreto Supremo 66/2010 Define actividades del sistema de pronóstico que sustenta el Plan Operacional para enfrentar Episodios Críticos de Contaminación por Material Particulado Respirable.* Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- [14] *Dirección Meteorológica de Chile (DCM) <http://www.meteochile.cl/>.*
- [15] *Google Earth <http://www.google.com/earth/>.*
- [16] *<http://www.conama.cl/rm/568/article-46525.html>, .*
- [17] *Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994).* Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- [18] *Plataforma computacional AIRVIRO <http://www.smhi.se/airviro>.*
- [19] *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) www.retc.cl.*
- [20] *Resolución 1.047/2000 Apruébase, como nueva aplicación de la metodología de pronóstico de calidad de aire para material particulado respirable MP10*

- en la Región Metropolitana, de acuerdo a lo establecido en el artículo 4 del decreto supremo N 59 de 1998 el modelo predictivo Cassmassi. <http://www.conama.cl/rm/568/article-1183.html>. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, .
- [21] *Resolución 11.481 de 1998 incorpora nuevas estaciones de monitoreo de calidad del aire.* Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA), actual Secretaría Regional Ministerial de Salud Región Metropolitana, .
- [22] *Resolución 12.612/1998 aprueba primera aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire en la ciudad de Santiago.* Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente de la Región Metropolitana (SESMA, actual SEREMI Metropolitana de Salud), .
- [23] *Resolución 369/1988 Establece índice de calidad del aire para determinar el nivel de contaminación atmosférica de la Región Metropolitana.* Ministerio de Salud; Subsecretaría de Salud.
- [24] *SEREMI Salud RM www.asrm.cl.*
- [25] *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)* <http://sinca.conama.cl/>.
- [26] Homologación de bases de datos sectoriales incluidas en el registro nacional de emisiones y transferencia de contaminantes (retc) en Chile http://www.sinia.cl/1292/articles-37764_pdf_informe_final.pdf. Inf. téc., Informe final, encargado por CONAMA, 2008.
- [27] Boubel Richard W.; Fox Donald L. ; Turner D. Bruce ; Stern Arthur C. *Fun-*

- damentals of Air Pollution*, tomo I. Academic Press, Elsevier, Orlando, 3 ed^{ón}., 1994.
- [28] Cassmassi Joseph C. Improvement of the forecast of air quality and the knowledge of the local meteorological conditions in the metropolitan region. Inf. téc., California, USA, Technical Report Number 3, encargado por CONAMA, december 1999.
- [29] Cassmassi Joseph C. Improvement of the forecast of air quality and the knowledge of the local meteorological conditions in the metropolitan region. Inf. téc., California, USA, Technical Report Number 1, encargado por CONAMA, may 1999.
- [30] Cassmassi Joseph C. Improvement of the forecast of air quality and the knowledge of the local meteorological conditions in the metropolitan region. Inf. téc., California, USA, Technical Report Number 2, encargado por CONAMA, september 1999.
- [31] Centro Mario Molina Chile. Análisis retrospectivo 1997-2007, calidad del aire en la región metropolitana <http://www.cmmolina.cl/>. Inf. téc., Documento final, encargado por CONAMA, diciembre 2008.
- [32] Centro Mario Molina Chile. Evaluación y propuesta de rediseño para la red de monitoreo automático de calidad del aire de la región metropolitana red macam-2. Inf. téc., Informe final, encargado por CONAMA RM, junio 2006.
- [33] Figueruelo Alejano Juan E. y Marino Dávila Martín. *Química-Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales*, tomo I. Editorial Reverté, España y México, 1 ed^{ón}., 2004.

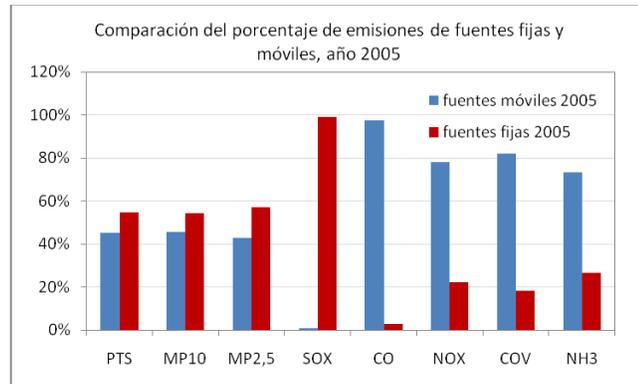
- [34] Gramsch E., Cereceda-Balíe F., Oyola P., y Von Baer D. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of pm10 and ozone data. *Atmospheric Environment*, 40:5464–5475, 2006.
- [35] Morales Raúl (Editor). *Contaminación atmosférica urbana, Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, tomo I. Editorial Universitaria, Chile, Santiago, 1 ed^{ón}., 2006.
- [36] Gramsch L. Ernesto. Caracterización fisicoquímica, monitoreo y distribución del material particulado fino y grueso en la región metropolitana. Inf. téc., Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile, Informe final encargado por CONAMA, diciembre 2005.
- [37] Kavouras Lias G., Koutrakis Petros, Cereceda-Balíe Francisco, Oyola Pedro, y Von Baer D. Source apportionment of pm10 and pm2.5 in five Chilean cities using factor analysis. *J. Air & Waste Manage*, 51:451–464, 2001.
- [38] Cohen Jacob, Cohen Patricia, West Stephen G., y Aiken Leona S. *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*, tomo I. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, London, 3 ed^{ón}., 2003.
- [39] Arellano Díaz Javier. *Introducción a la Ingeniería Ambiental*, tomo I. AlfaOmega Grupo Editor S.A. de C.V., México, D.F., 1 ed^{ón}., 2002.
- [40] Pérez P. y Reyes J. Prediction of maximum of 24-h average of pm10 concentrations 30 h in advance in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment*, 36:4555–4561, 2002.
- [41] Pérez P. y Reyes J. An integrated neural network model for pm10 forecasting. *Atmospheric Environment*, 40:2845–2851, 2006.

-
- [42] Sanhueza P.; Vargas C.; Mellado P. Impacto de la contaminación del aire por pm10 sobre la mortalidad diaria en temuco. *Revista médica de Chile*, 134:754–761, 2006.
- [43] Sanhueza Pedro. Caracterización fisicoquímica, monitoreo y distribución del material particulado fino y grueso en la región metropolitana, informe final encargado por conama. Inf. téc., Departamento de Geografía, Universidad de Santiago de Chile, diciembre 2005.
- [44] Schmitz Rainer y Falvey Mark. Evaluación de los modelos de pronóstico de mp10 actualmente en uso en la región metropolitana, documento final, encargado por conama. Inf. téc., Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, febrero 2007.
- [45] RETC. Reporte 2005 - 2007 registro de emisiones y transferencia de contaminantes (retc), documento final. Inf. téc., encargado por CONAMA, noviembre 2009.
- [46] Departamento de Geofísica. Universidad de Chile Rutllant C. José; Garreaud René. Meteorological air pollution potential for santiago chile: towards an objective episode forecasting. 1995.
- [47] Departamento de Geofísica. Universidad de Chile Rutllant C. José; Salinas Hugo. Un índice diario del potencial meteorológico de contaminación atmosférica para santiago a partir de perfiles verticales de viento. *TRALKA*, 2:387–404, 1985.
- [48] Berrios Víctor y Acosta Erika. Red de monitoreo de calidad del aire de la región metropolitana: Conformación y principales funciones de los integrantes del

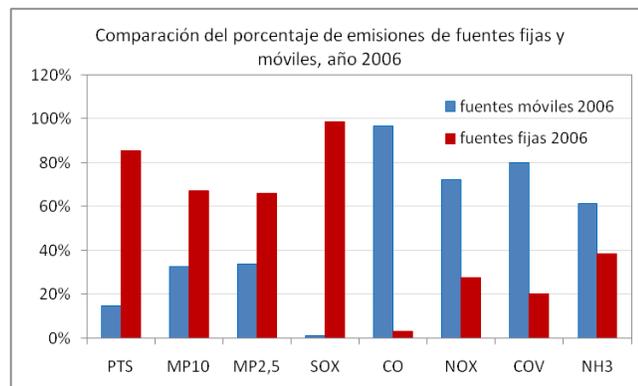
equipo de trabajo, informe final. Inf. téc., Departamento Salud Pública Sanitaria SEREMI Salud, Subsecretaría de salud pública del Ministerio de Salud, junio 2006.

Apéndice A

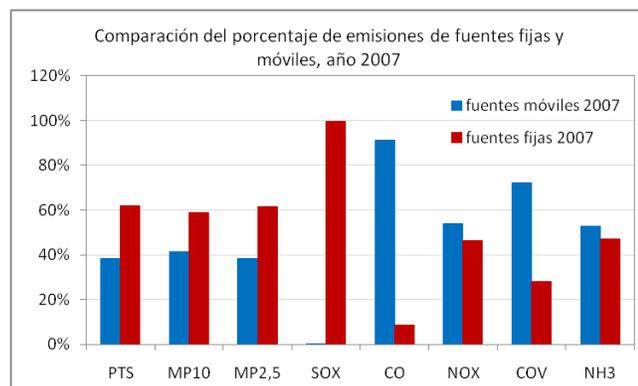
Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles para los años 2005, 2006 y 2007



(a) año 2005



(b) año 2006

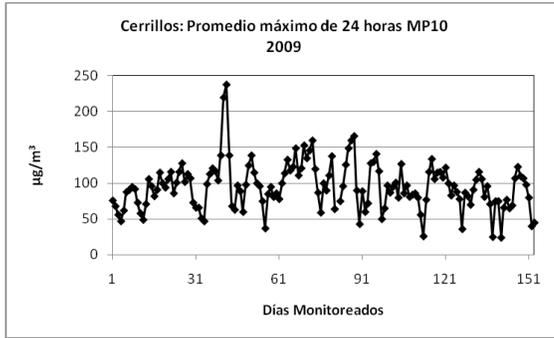


(c) año 2007

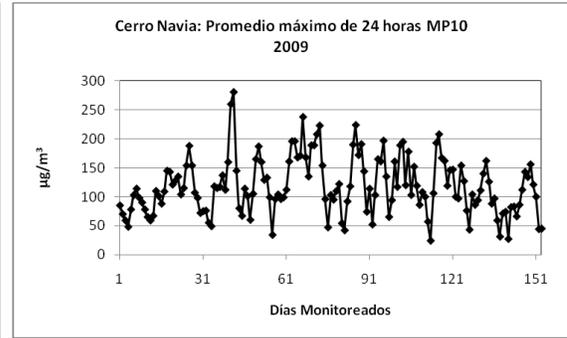
Figura A.1: Comparación del porcentaje de emisiones de fuentes fijas y móviles para los años 2005, 2006 y 2007

Apéndice B

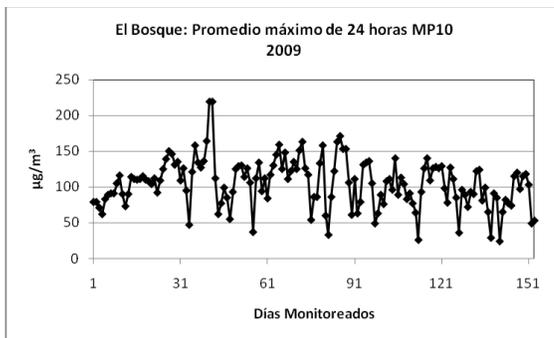
**Series de tiempo de los valores
diarios de concentraciones de 24
horas de MP10 de las estaciones
de la Red MACAM III, periodo
crítico año 2009**



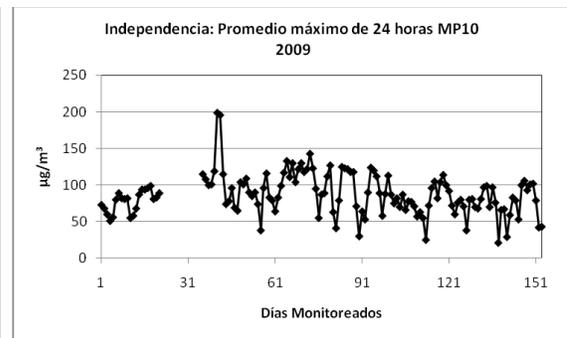
(a) Cerrillos



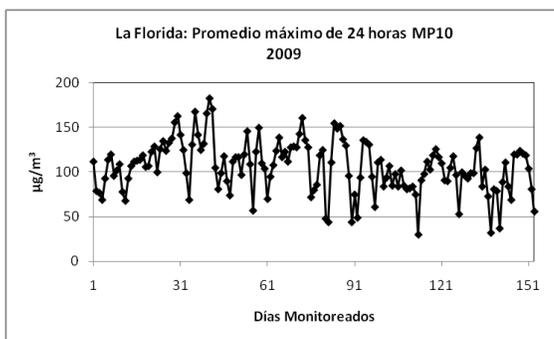
(b) Cerro Navia



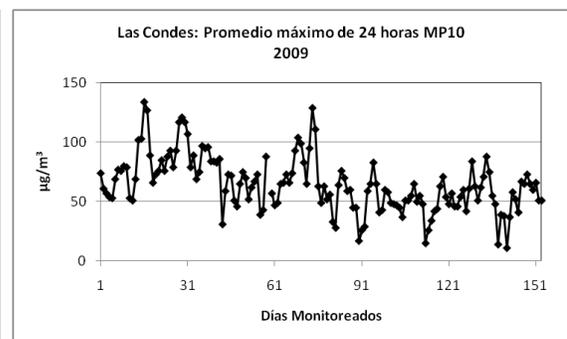
(c) El Bosque



(d) Independencia



(e) La Florida



(f) Las Condes

Figura B.1: Series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009

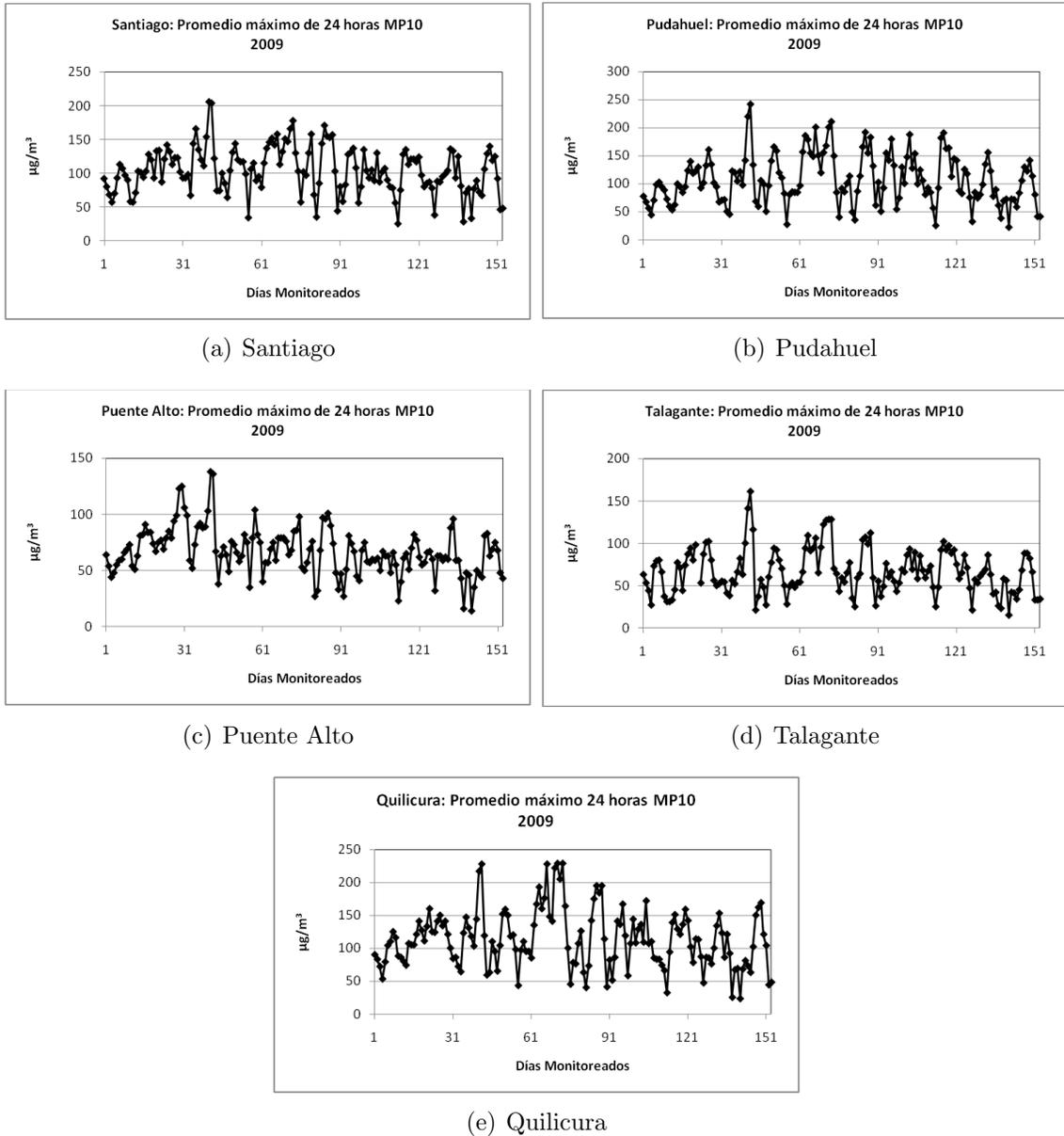
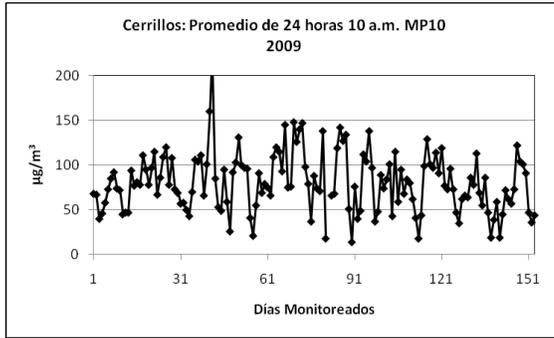
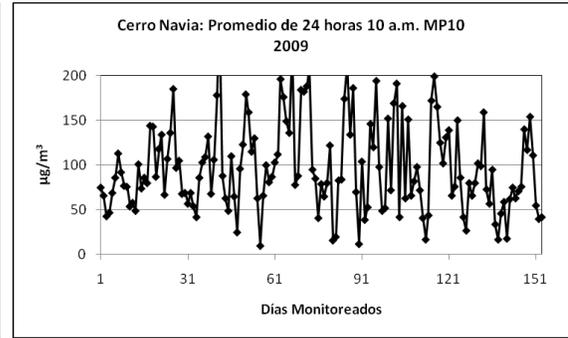


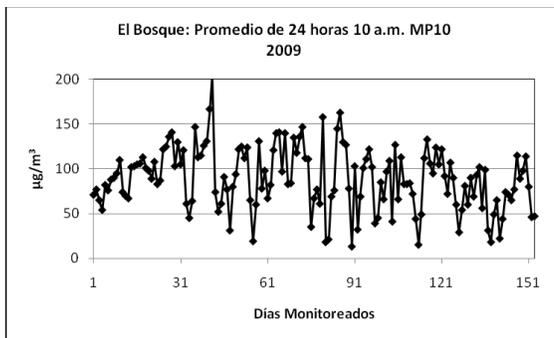
Figura B.2: Series de tiempo de los valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009



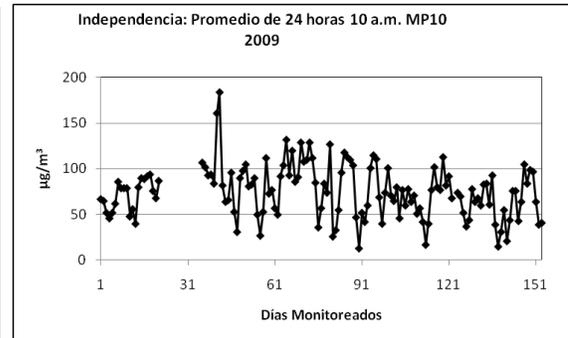
(a) Cerrillos



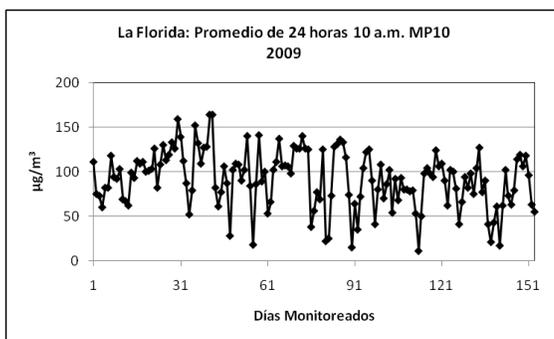
(b) Cerro Navia



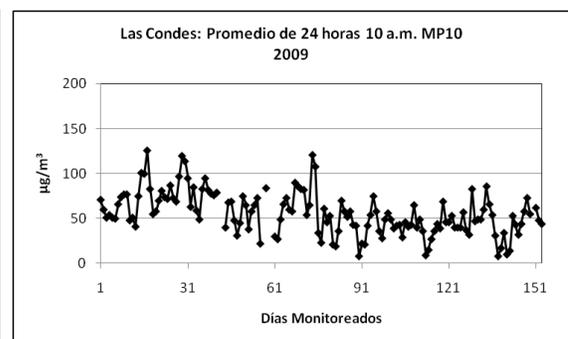
(c) El Bosque



(d) Independencia

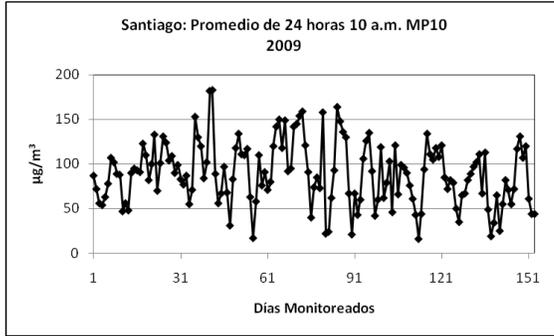


(e) La Florida

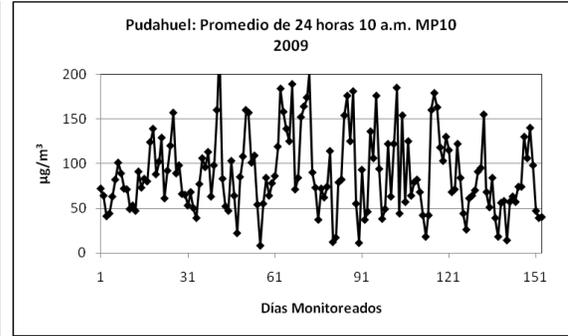


(f) Las Condes

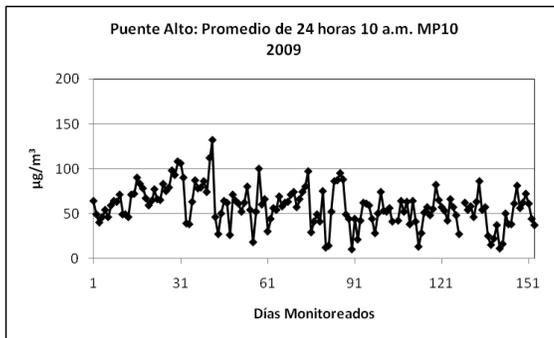
Figura B.3: Series de tiempo de los valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009



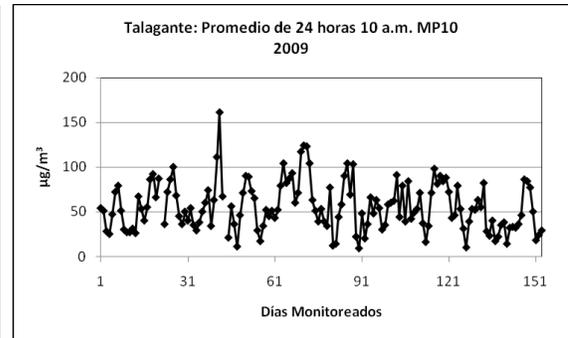
(a) Santiago



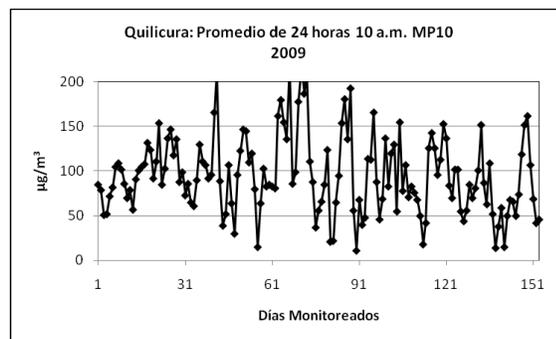
(b) Pudahuel



(c) Puente Alto



(d) Talagante



(e) Quilicura

Figura B.4: Series de tiempo de los valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10, año 2009

Apéndice C

**Valores diarios de concentraciones
de 24 horas de MP10 de las
estaciones de la Red MACAM III,
periodo crítico año 2009**

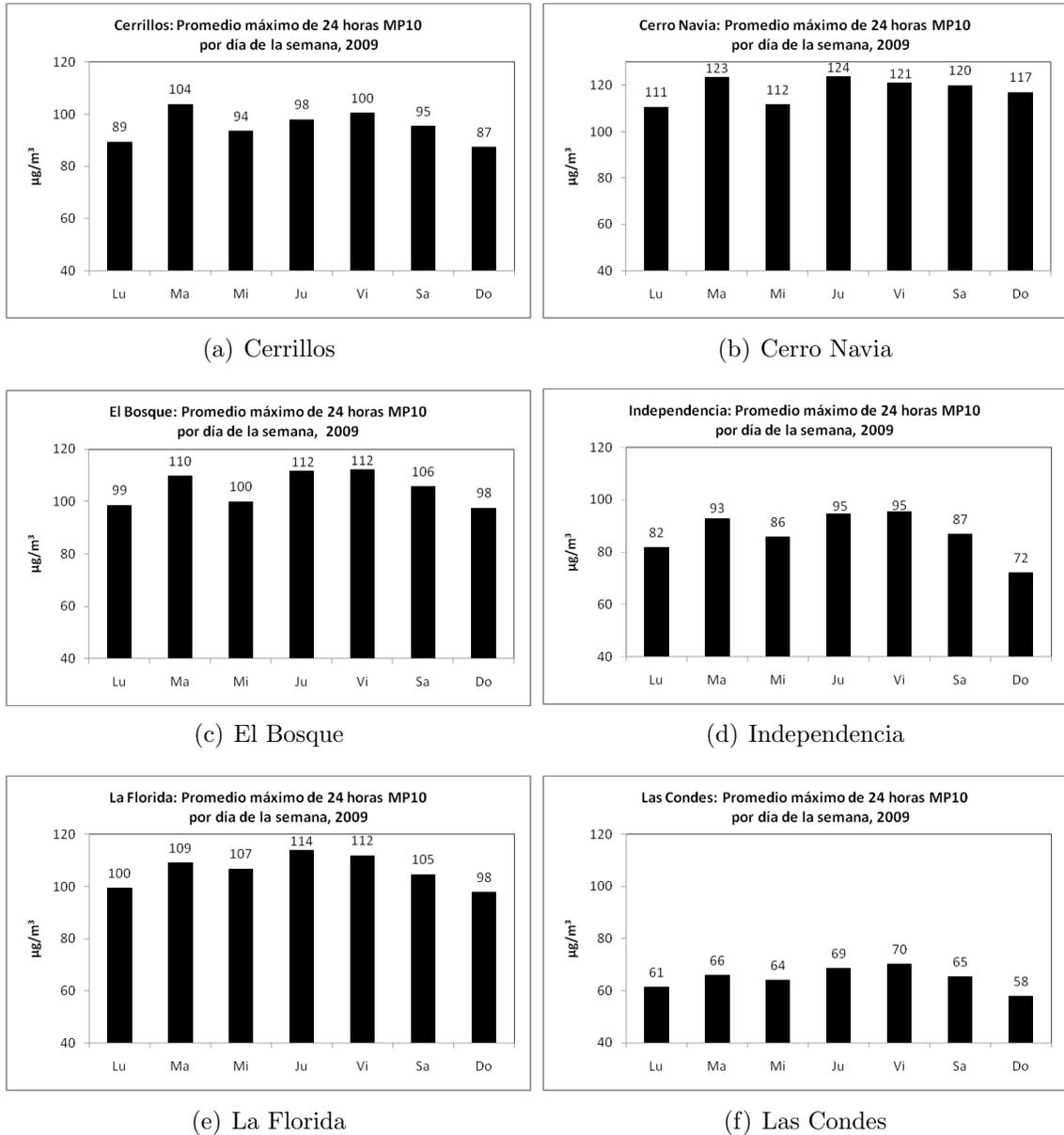


Figura C.1: Valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009

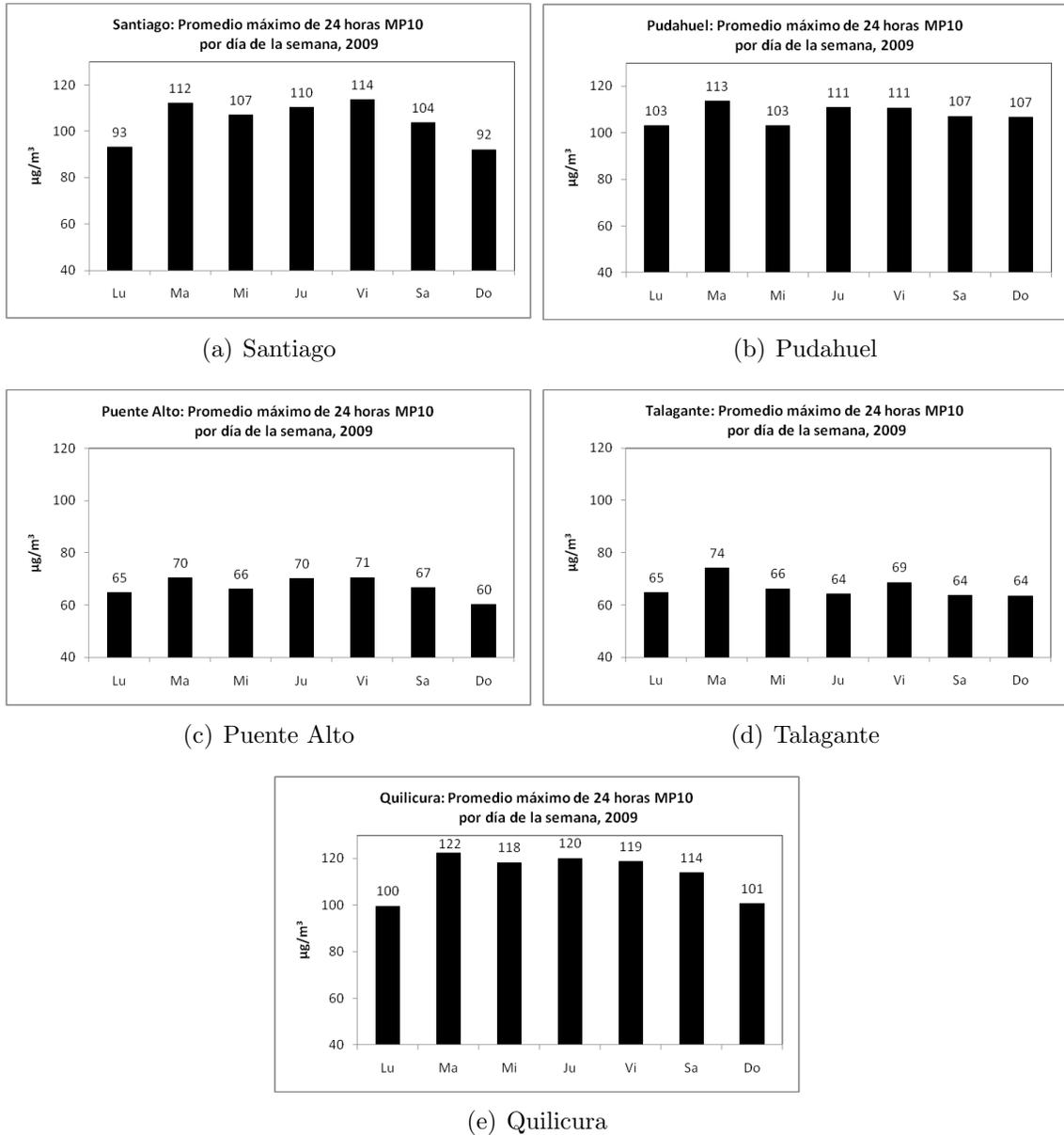


Figura C.2: Valores máximos diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009

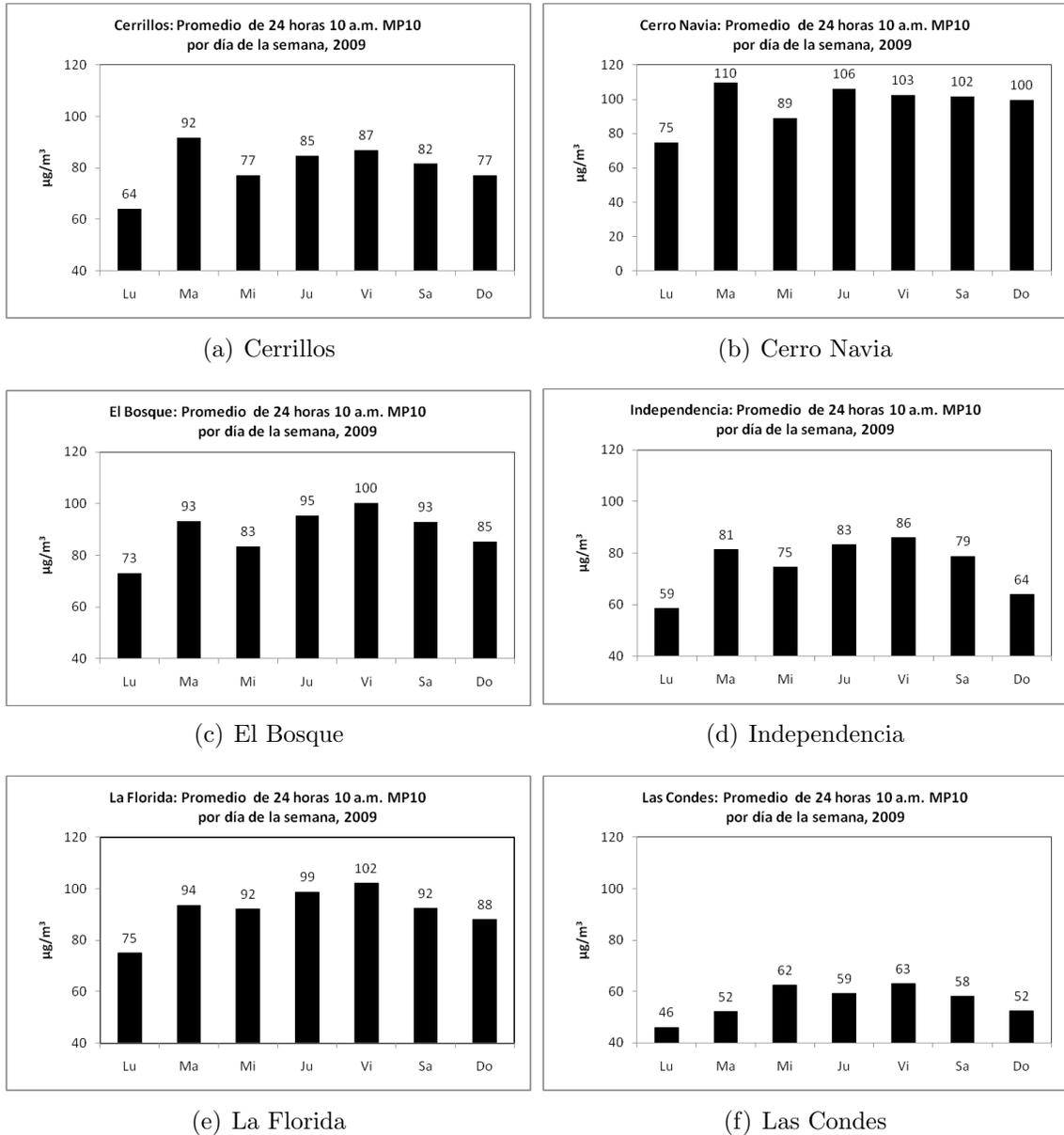


Figura C.3: Valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009

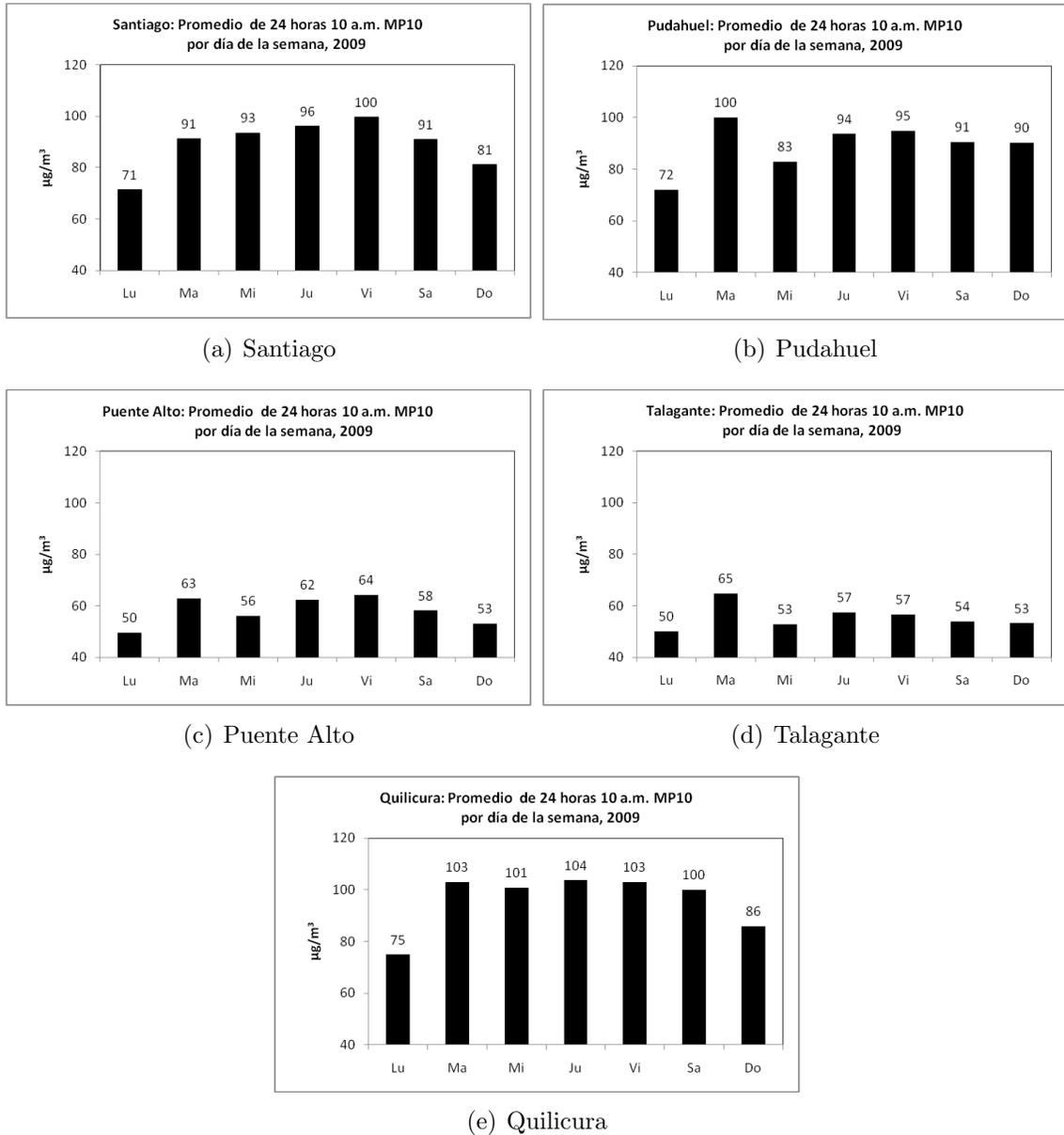


Figura C.4: Valores de 10 a.m. diarios de concentraciones de 24 horas de MP10 por día de la semana, año 2009

Apéndice D

**Concentración máxima de 24 horas
de MP10 observada v/s
pronosticada para los años 2009 y
2010**

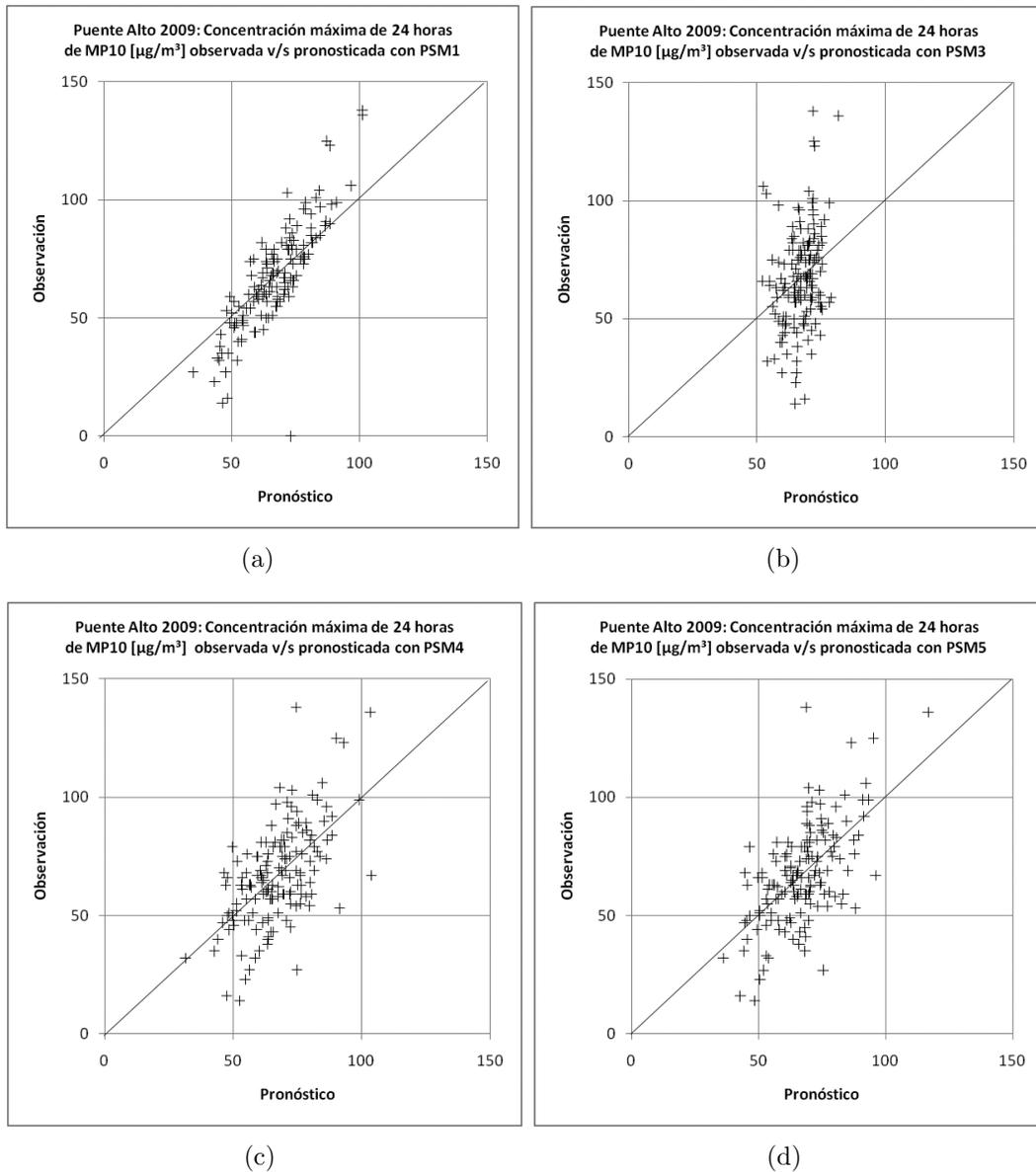


Figura D.1: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Puente Alto 2009

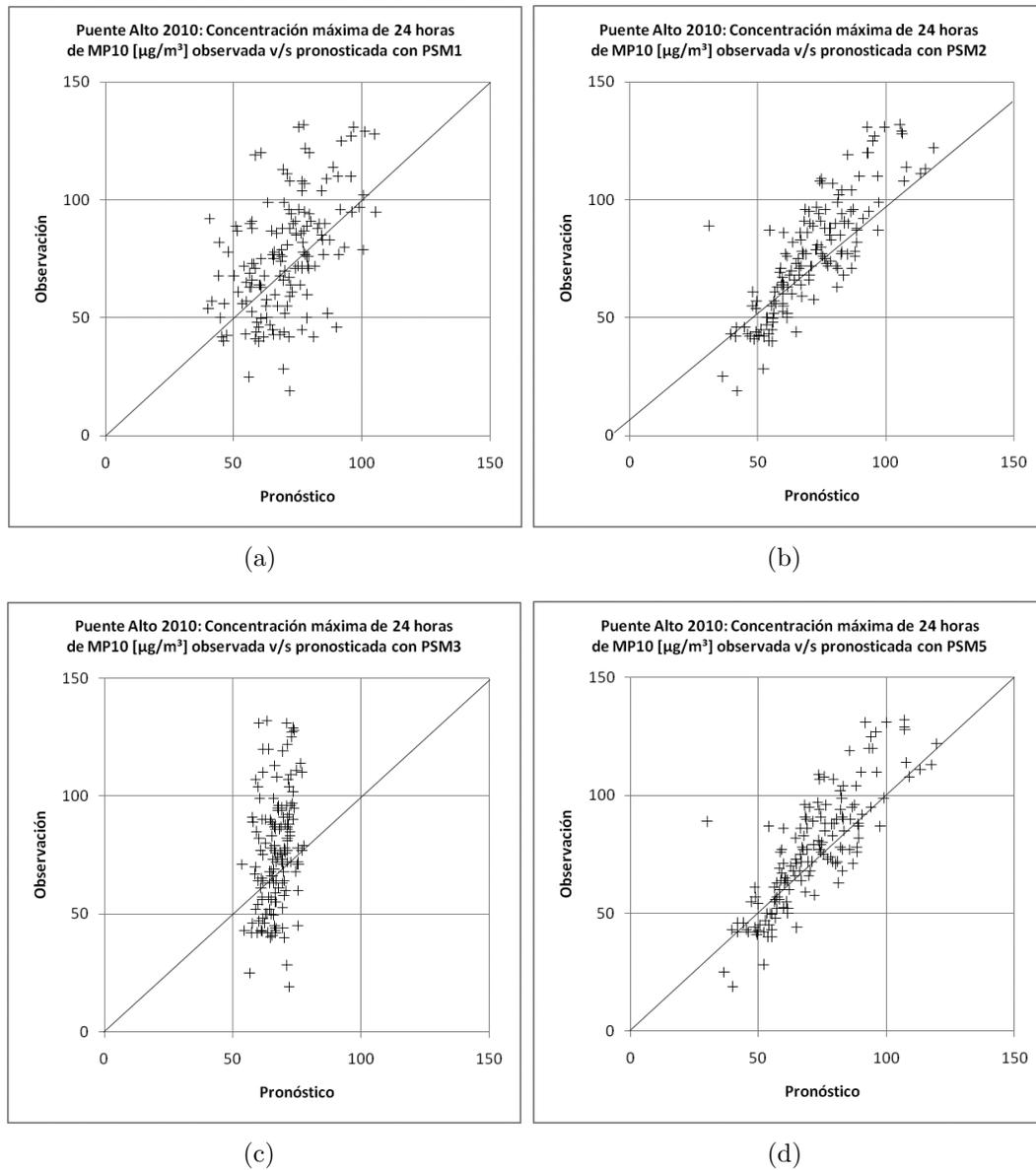


Figura D.2: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Puente Alto 2010

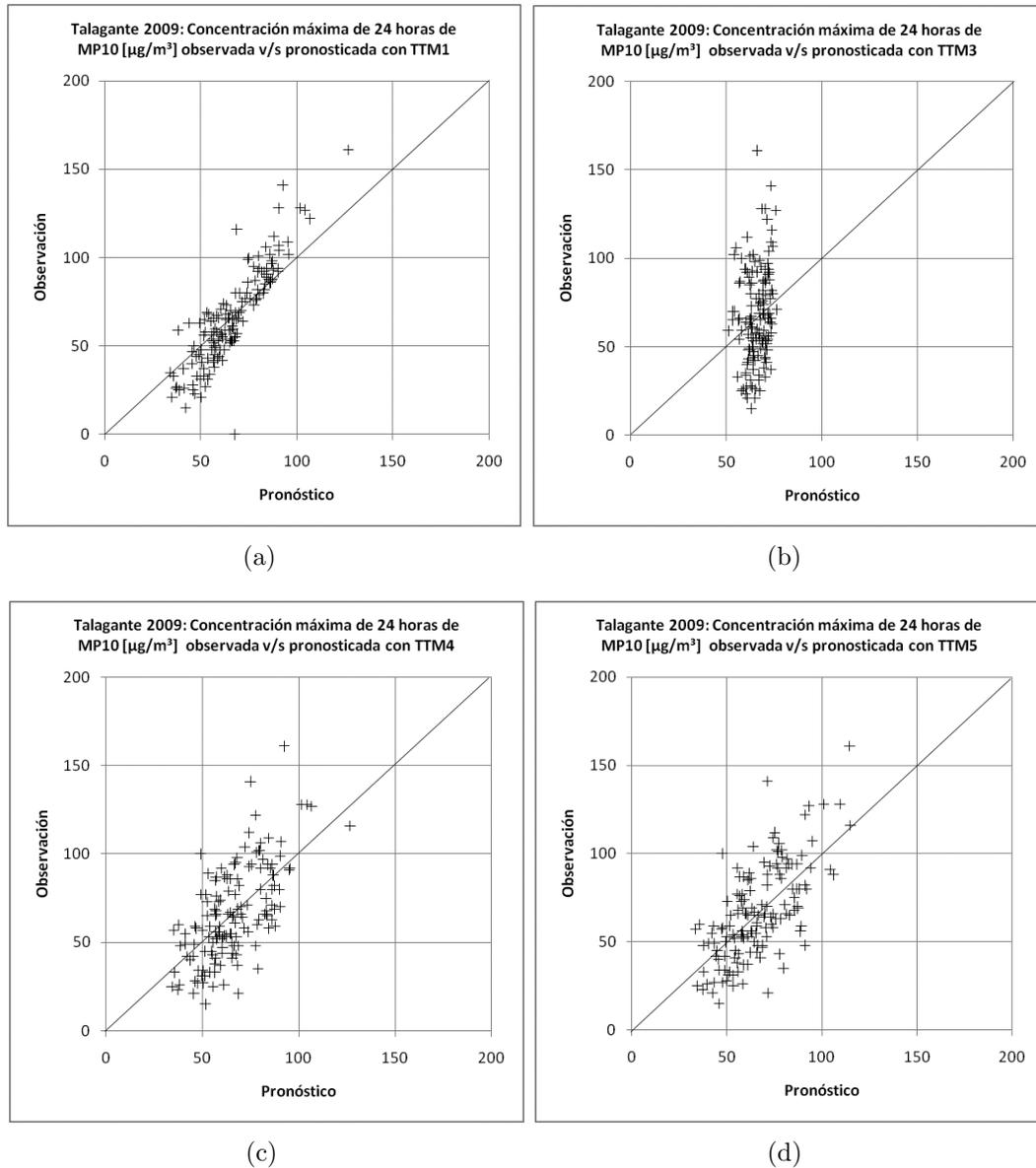


Figura D.3: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2009

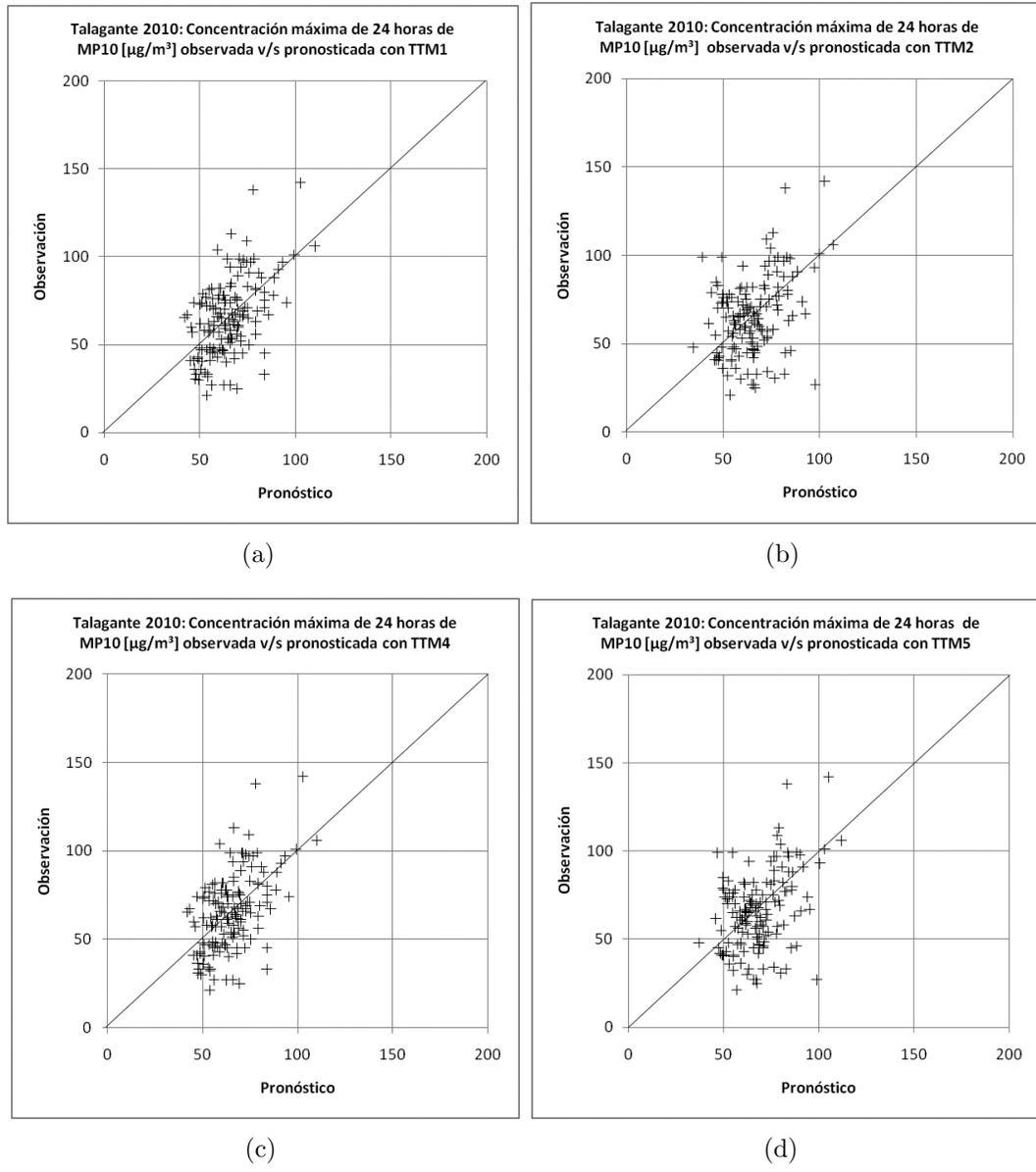


Figura D.4: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Talagante 2010

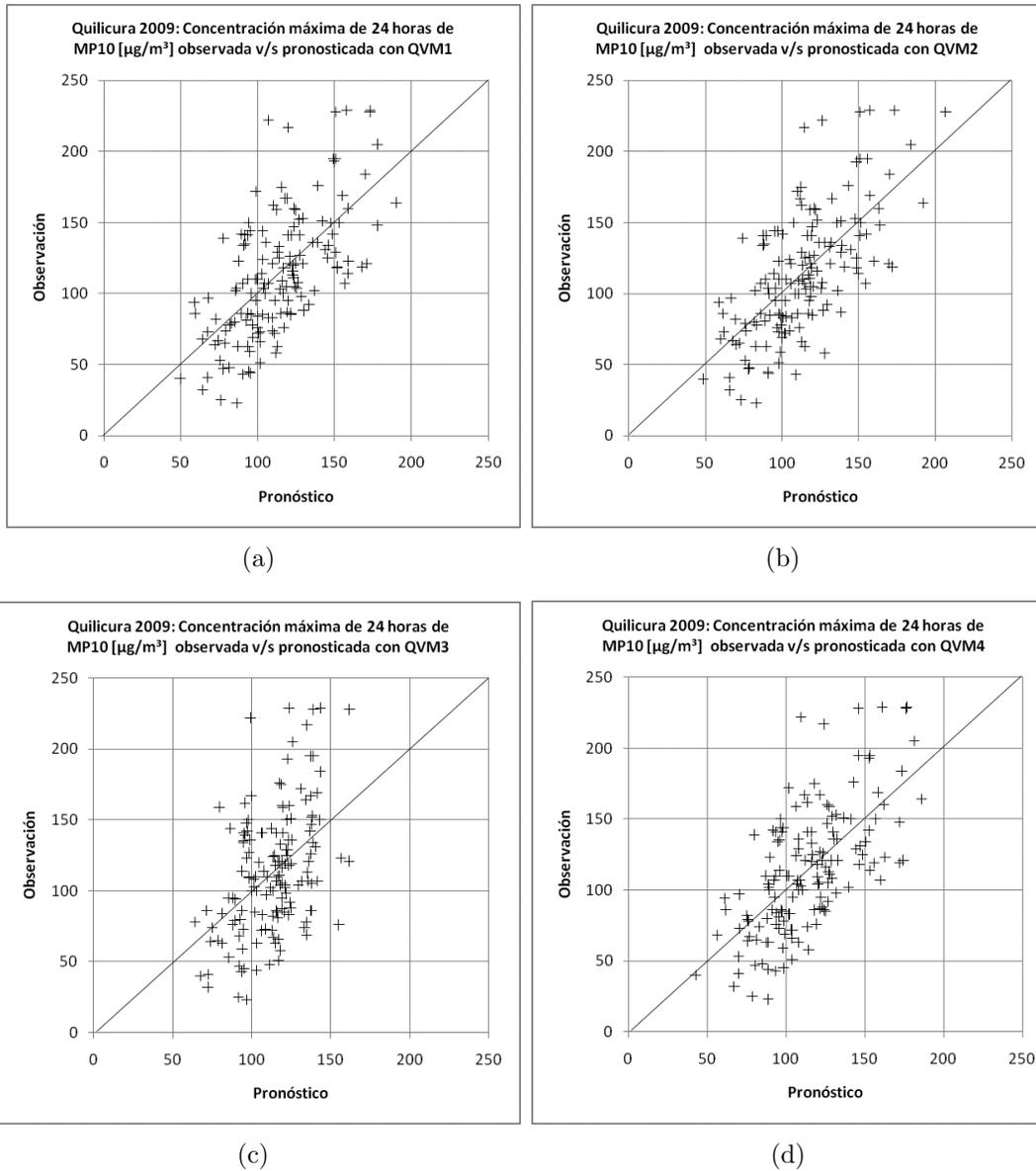


Figura D.5: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2009

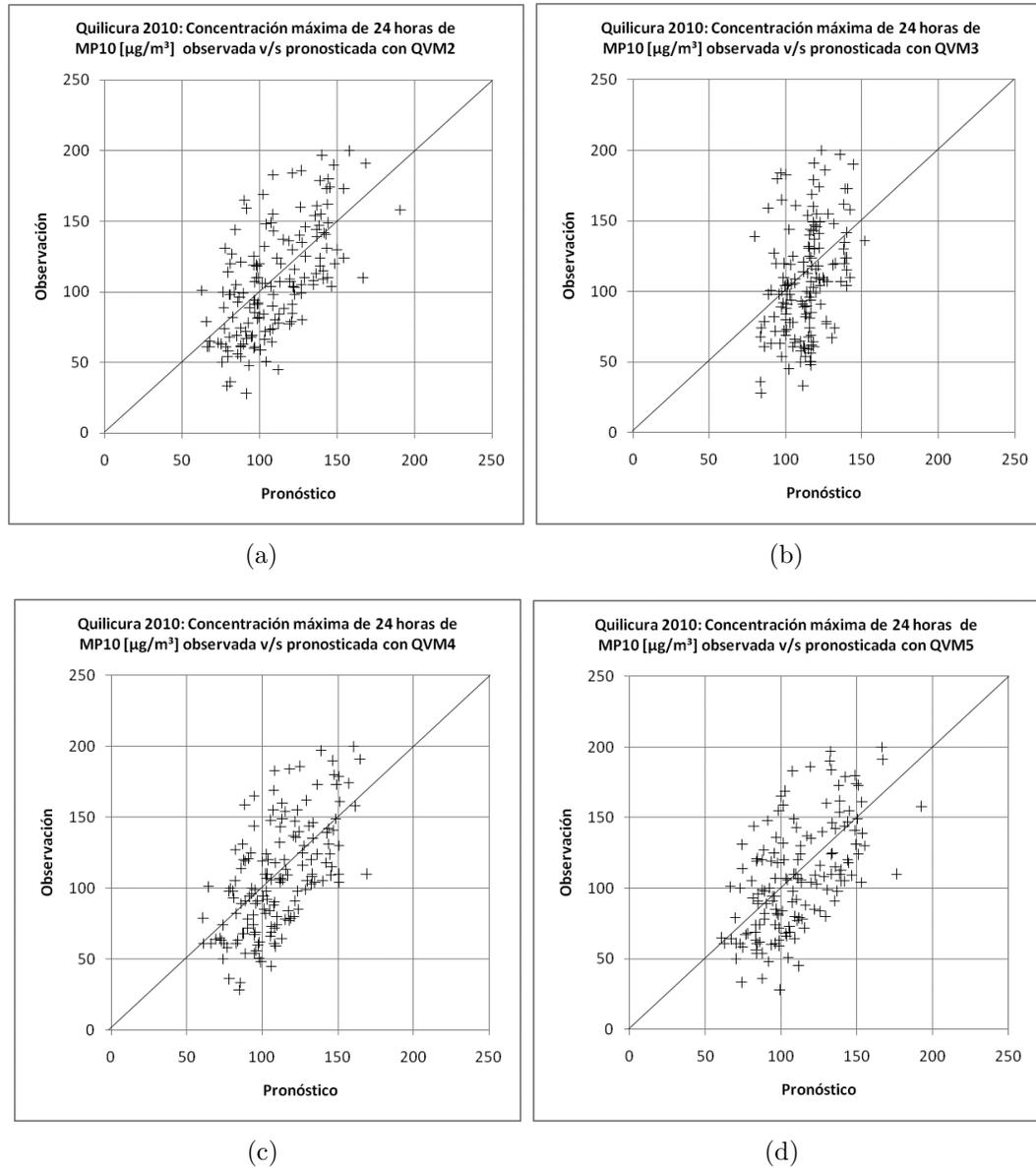
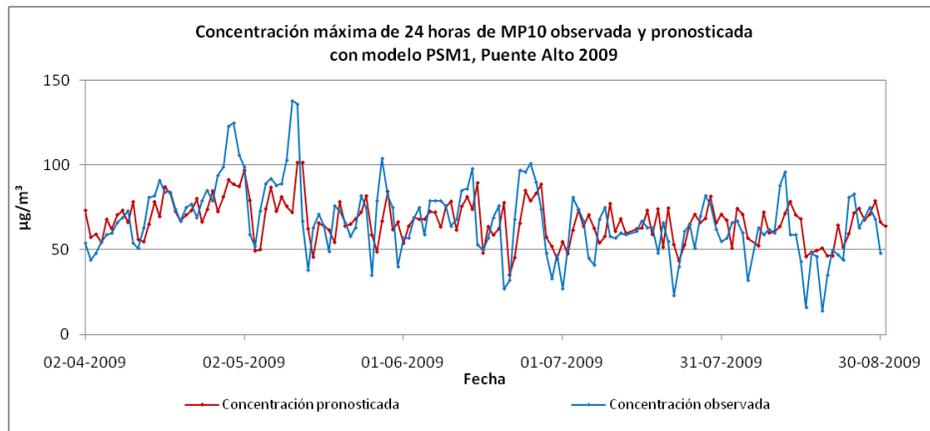


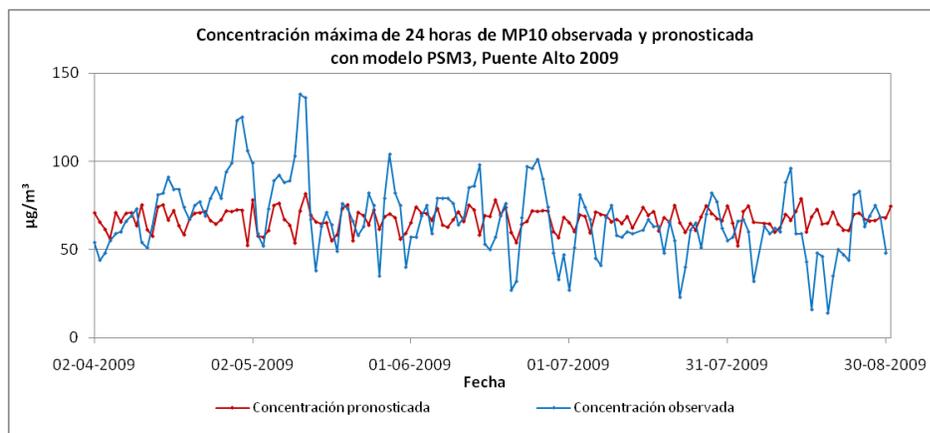
Figura D.6: Concentración máxima de 24 horas de MP10 observada v/s pronosticada en Quilicura 2010

Apéndice E

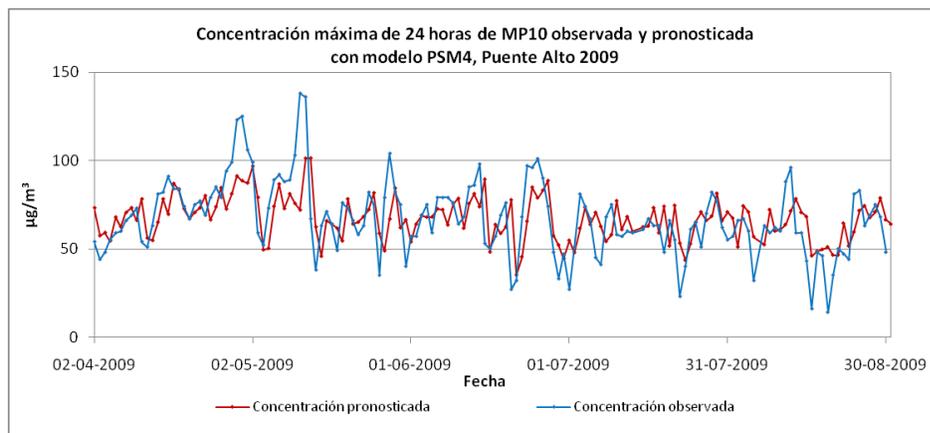
**Series de tiempo de
concentraciones máximas de 24
horas de MP10 observadas y
pronosticadas para los años 2009 y
2010**



(a)

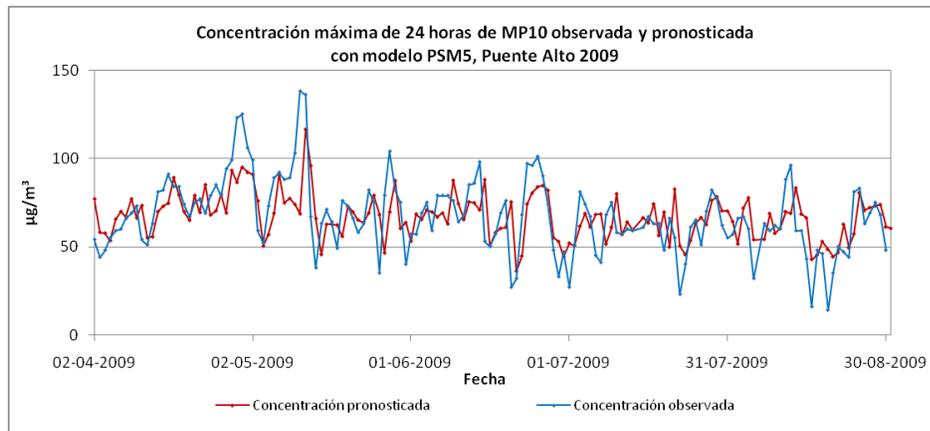


(b)

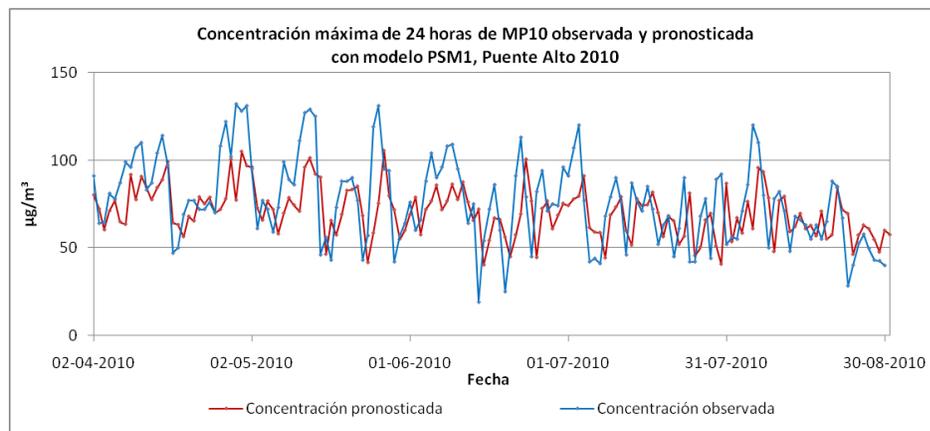


(c)

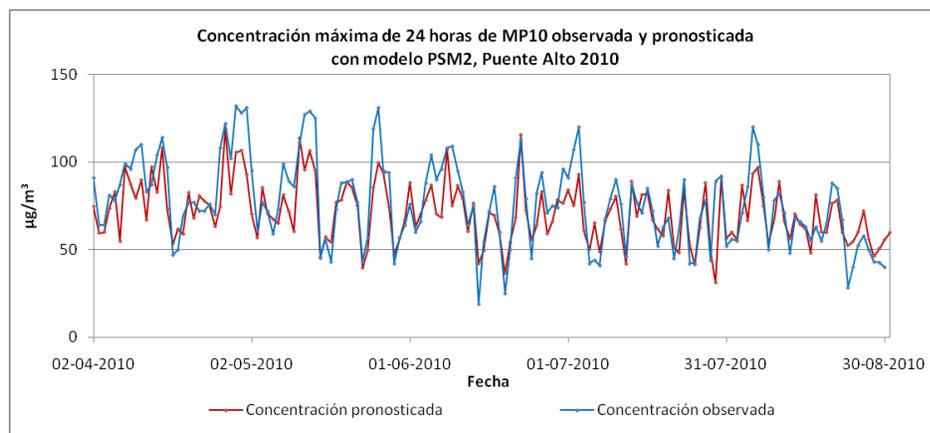
Figura E.1: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto



(a)

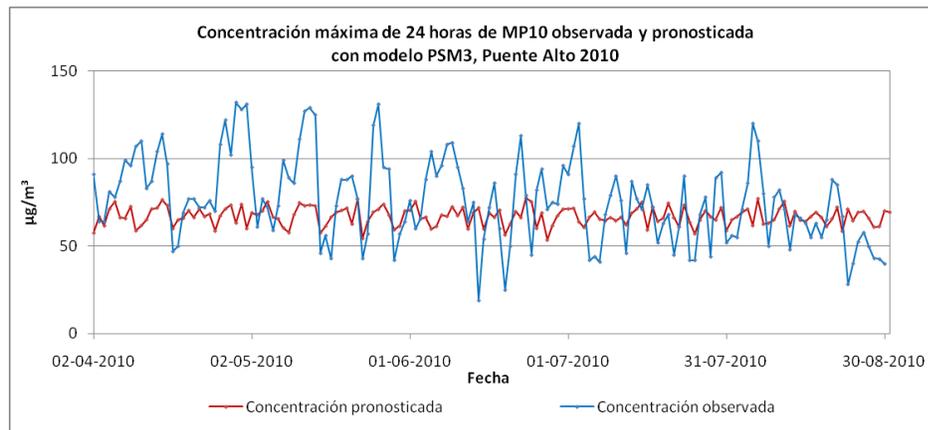


(b)

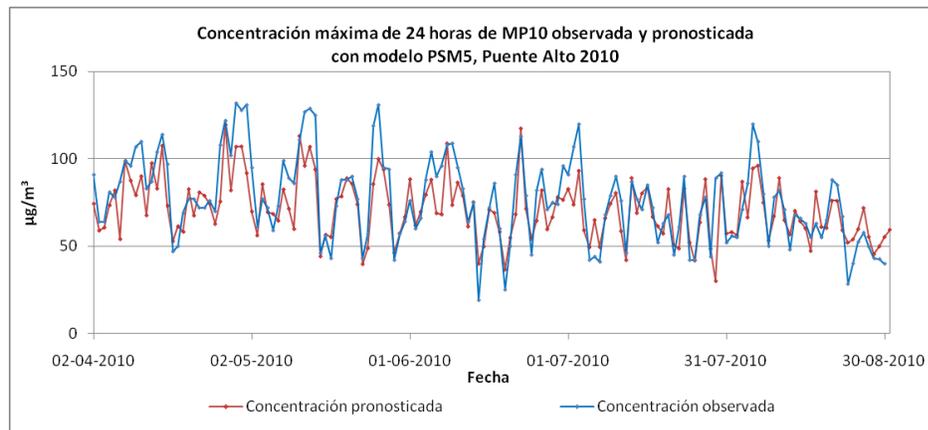


(c)

Figura E.2: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto

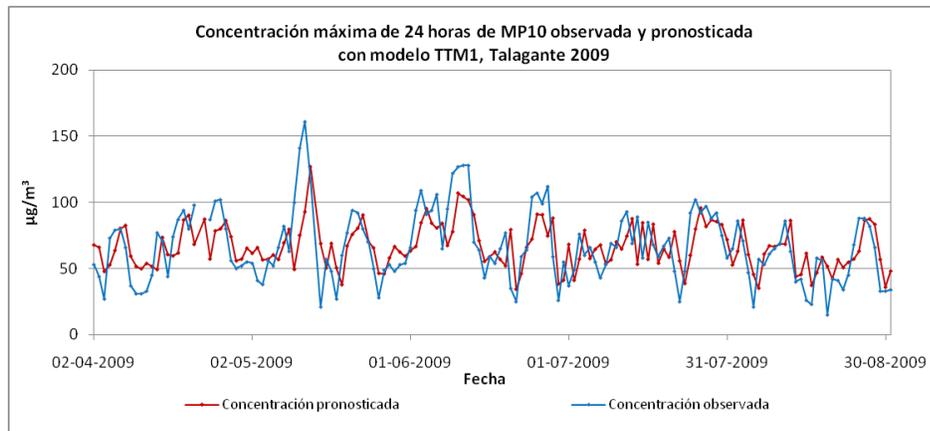


(a)

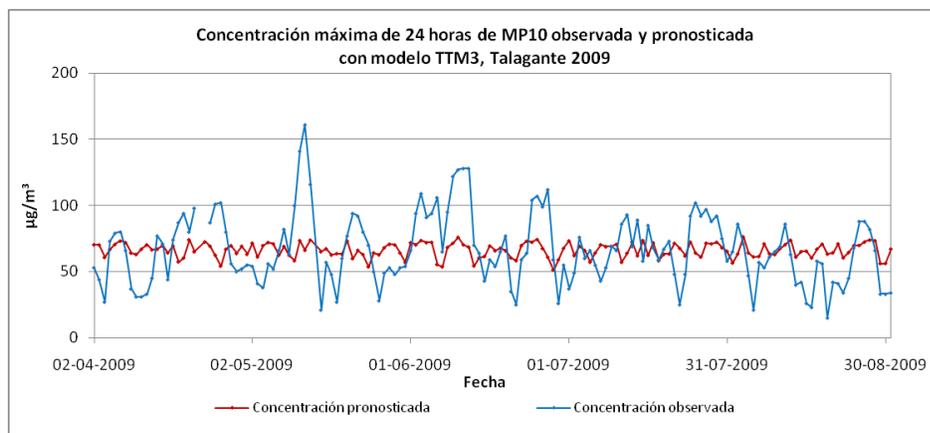


(b)

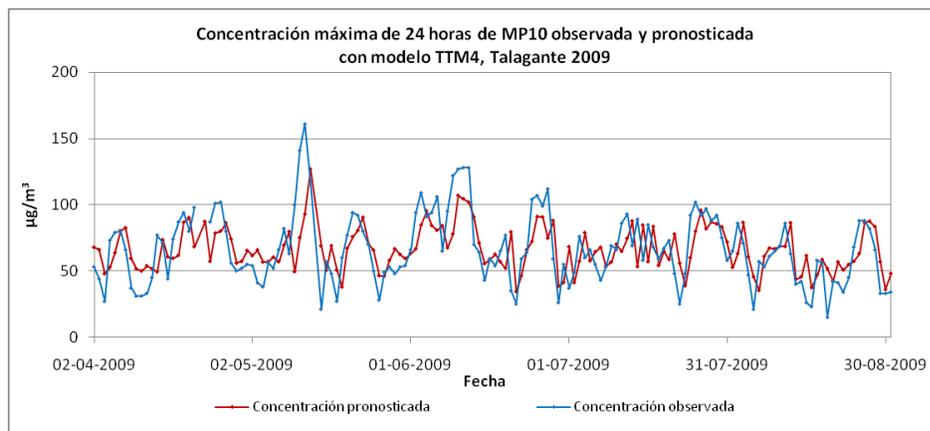
Figura E.3: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Puente Alto



(a)

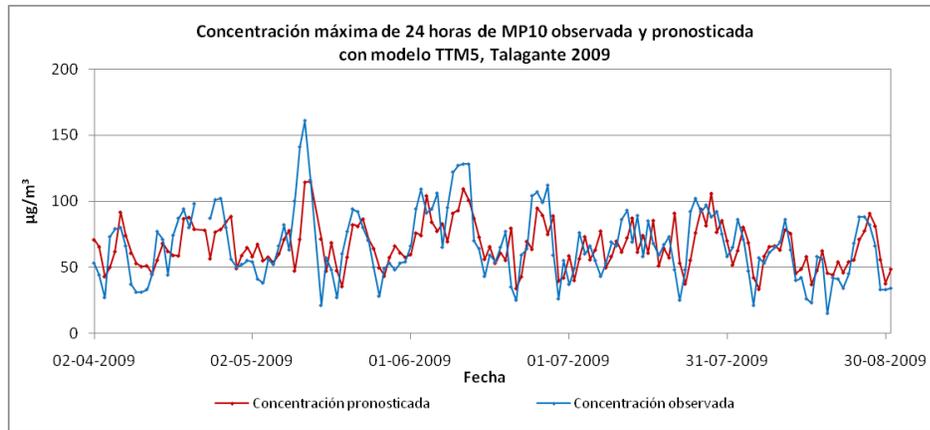


(b)

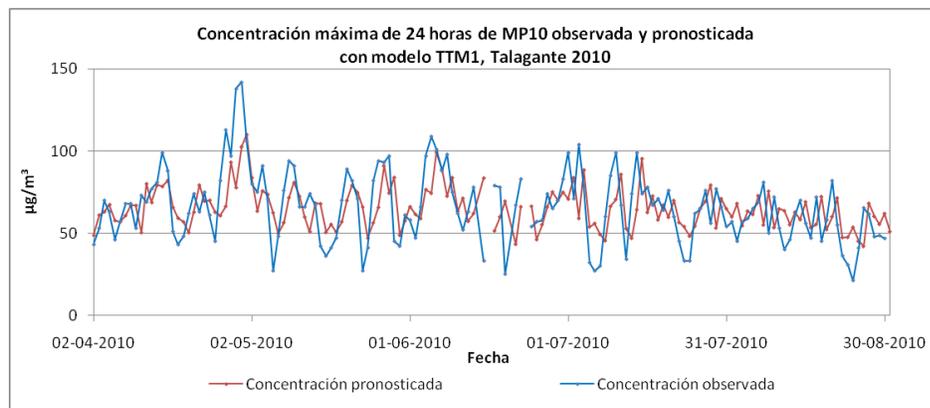


(c)

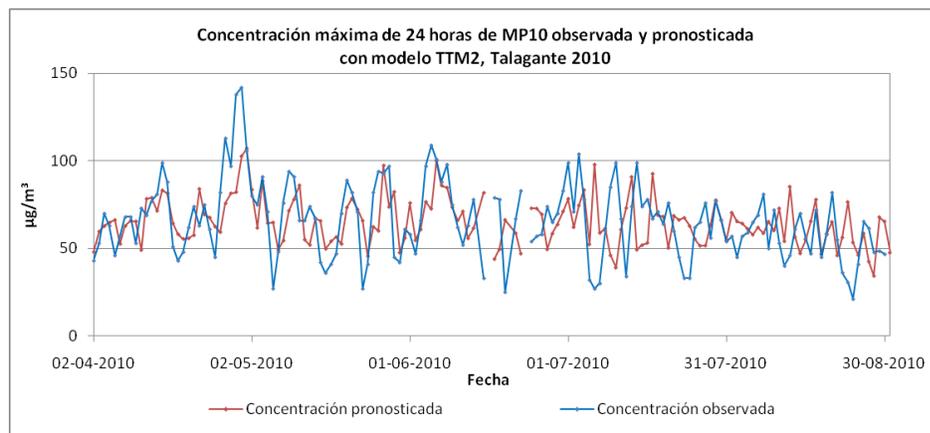
Figura E.4: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante



(a)

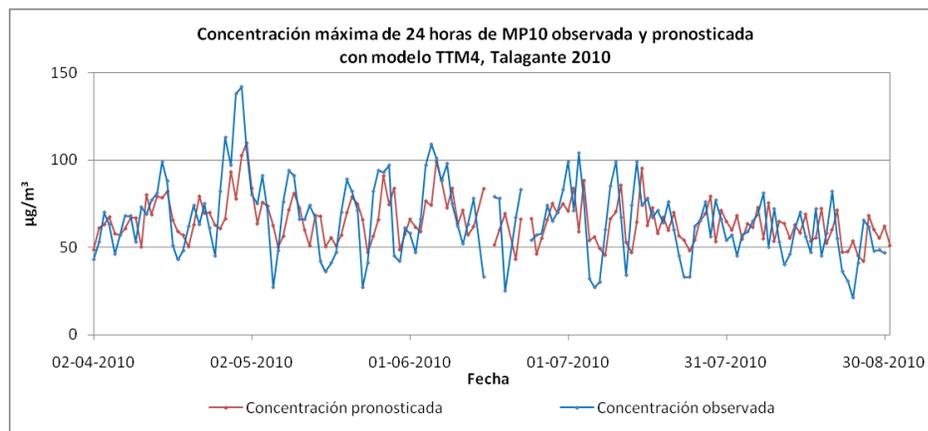


(b)

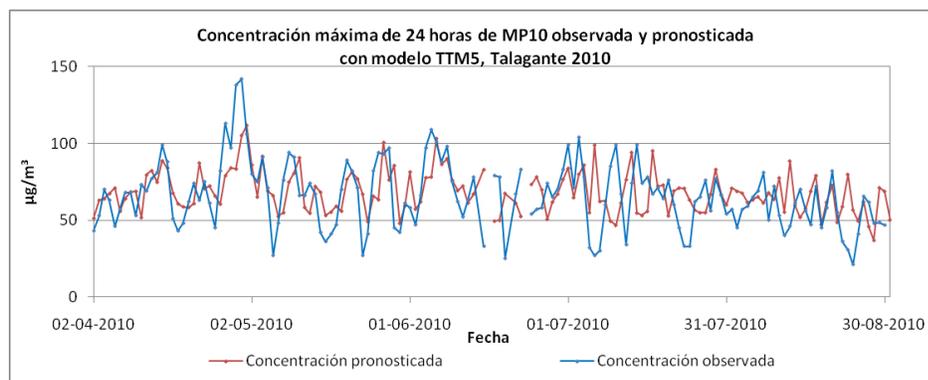


(c)

Figura E.5: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante

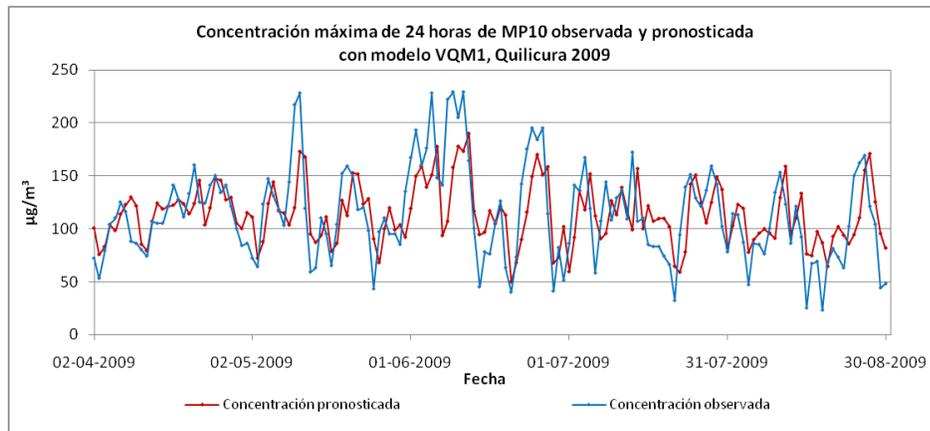


(a)

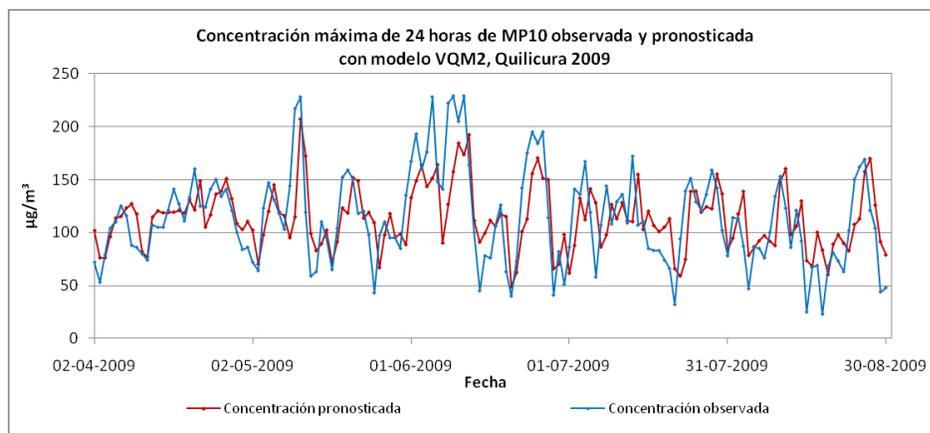


(b)

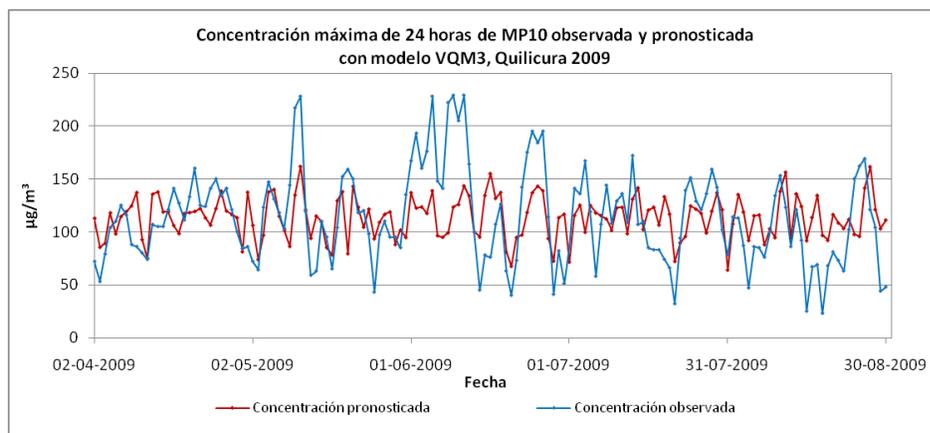
Figura E.6: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Talagante



(a)

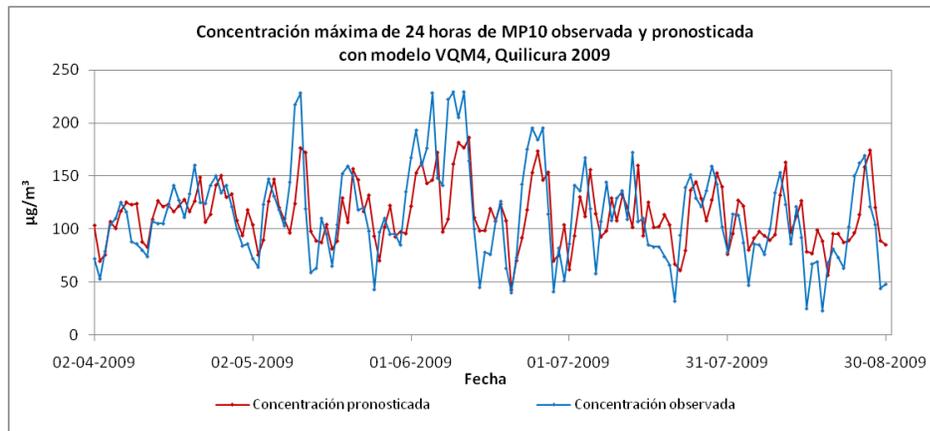


(b)

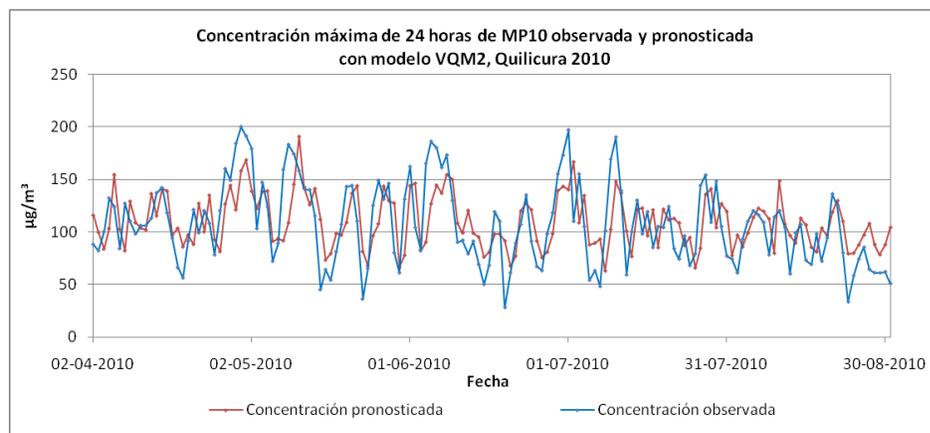


(c)

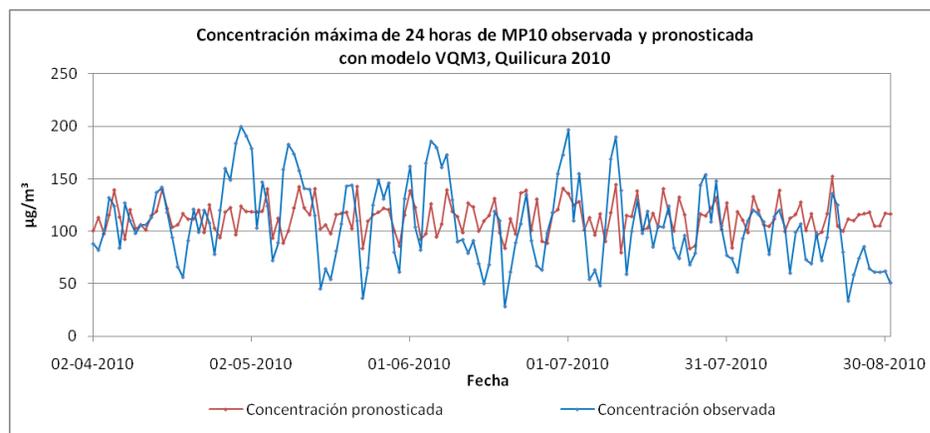
Figura E.7: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura



(a)

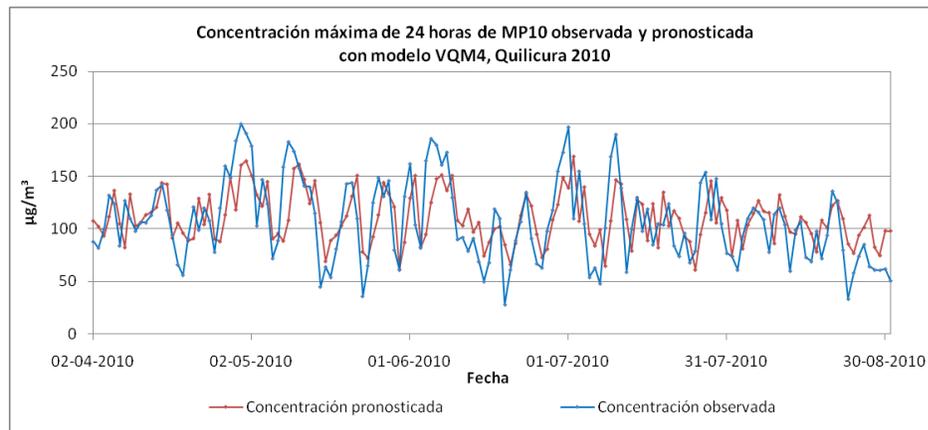


(b)

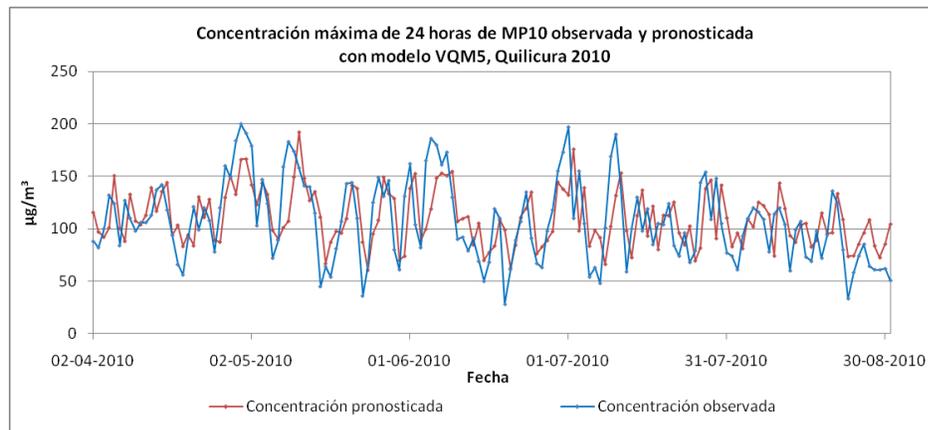


(c)

Figura E.8: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura



(a)



(b)

Figura E.9: Series de tiempo de concentraciones máximas de 24 horas de MP10 observadas y pronosticadas para Quilicura