



CONTAMINACION ATMOSFÉRICA Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

**COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
DIRECCIÓN REGIÓN METROPOLITANA**

RECONOCIMIENTO

Los documentos presentados a continuación son en parte el fruto del trabajo de un equipo de profesionales de CONAMA, en su mayoría pertenecientes al Área Descontaminación Atmosférica, entre los cuales se cuentan los expositores que presentarán los temas en el VI Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra”.

Un aporte igualmente importante proviene del trabajo del personal del Centro Nacional del Medio Ambiente, CENMA, en cuyos informes se basa gran parte del texto expuesto.

Finalmente, completa el aporte a este texto el trabajo de las numerosas personas del ámbito público y privado que formaron los núcleos temáticos constituidos en el marco del proceso de Reformulación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica, cuyo esfuerzo está plasmado en el documento “Bases para la reformulación del Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana”¹, el cual se presenta extractado en el tercer capítulo de esta presentación.

A todos ellos, nuestros agradecimientos más sinceros.

¹ CONAMA, marzo 2000.

Capítulo 1

Pronóstico de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago

Expositora: Roxana Sanguinetti Castro

Resumen

Durante los meses de otoño – invierno se registran periódicamente eventos de altos índices de material particulado respirable en Santiago. Si bien algunos otros contaminantes también muestran alzas durante estos eventos, no alcanzan niveles considerados de episodio según la normativa vigente.

Las emisiones directas de contaminantes que se generan diariamente en la ciudad se mantienen aproximadamente estables durante todo el año. Sin embargo, las condiciones meteorológicas son sustancialmente diferentes entre verano e invierno. Durante el estío, el calentamiento solar induce una vigorosa brisa diurna y una buena mezcla de aire en la vertical, lo cual favorece que los contaminantes se difundan en un volumen considerablemente mayor dentro de la cuenca. En cambio en invierno, la disminución de la energía solar recibida incide en una moderación de la brisa diurna y de la mezcla de aire, de modo que los contaminantes tienden a permanecer estancados, hasta que una situación atmosférica inestable rompe este comportamiento (por ejemplo, el paso de un sistema frontal activo). Bajo ciertas configuraciones sinópticas la situación antes descrita se torna crítica para la dispersión de los contaminantes, conduciendo a la ocurrencia de episodios de alta contaminación (Rutllant, J. & Garreaud, R., 1995).

Por lo tanto, para una adecuada gestión de episodios invernales es preciso adelantarse a la ocurrencia de estas condiciones meteorológicas extremas, para reducir las emisiones durante el periodo en que éstas se registran, y evitar que las concentraciones de contaminantes sigan aumentando. Por esta razón se realiza una continua vigilancia de los fenómenos meteorológicos que afectan la región, y se han elaborado modelos de pronóstico de calidad de aire.

El modelo de pronóstico de calidad de aire vigente, llamado modelo *Cassmassi* (Cassmassi, 1999), corresponde a un conjunto de ecuaciones desarrolladas a partir de variados análisis regresionales de la información meteorológica y de calidad de aire de los años 1997, 1998 y 1999. El acierto general del modelo entre abril y junio de 2000 es del orden del 77%, destacándose una clara mejoría en el acierto a condiciones de episodio en relación con los métodos anteriormente usados en la declaración de eventos (entre el 56% y el 60%) (CENMA, 2000).

Capítulo 1

Pronóstico de Episodios de Contaminación Atmosférica en Santiago

1.1. Características climáticas de la zona central

El clima de la zona central de Chile se encuentra modulado por dos factores principales: la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental, y el paso de largas ondas atmosféricas, en cuyo seno se alternan los sistemas de altas y bajas presiones. A estos fenómenos de escala hemisférica, se suman otros de menor escala como las depresiones costeras, la brisa mar-continente, la brisa montaña-valle, etc., que determinan en gran parte las condiciones para la dispersión de los contaminantes en la cuenca.

El Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental es un centro de altas presiones de carácter semi-permanente que afecta gran parte del país, con variaciones estacionales en su ubicación y su intensidad. Durante el verano, el anticiclón se encuentra desplazado hacia el sur, alcanzando latitudes de 40°S, mientras en invierno se repliega al norte, ubicándose preferentemente en torno a los 30°S.

En su interior se observa el descenso (subsistencia) de aire proveniente del Ecuador, el cual se calienta y se seca producto de la compresión que le impone dicho movimiento. Este flujo cálido se encuentra con el aire frío y húmedo subyacente, de origen marino, produciéndose una discontinuidad en las condiciones atmosféricas, de modo que el aire cálido se encuentra sobre el aire frío, lo cual constituye una situación termodinámica muy estable, que no induce a la mezcla vertical de las masas de aire.

Inversiones térmicas

Se entiende por inversión térmica una capa de aire en la cual la temperatura aumenta con la altura. La condición usual en una atmósfera estándar es que la temperatura baje con la altura, a razón de 7°C/Km.

La situación de estabilidad atmosférica descrita en relación con el Anticiclón Subtropical, corresponde a una “inversión térmica de subsidencia”. También pueden existir inversiones térmicas de otro origen, como por ejemplo, debido a la superposición de masas de aire de distinto origen en un sistema frontal (inversiones frontales), o debido al enfriamiento radiativo de la superficie en comparación al aire sobreyacente (inversión radiativa). En el caso de Santiago, suelen superponerse las inversiones radiativa y de subsidencia, especialmente durante horas de la noche y la madrugada.

A través del día, el calentamiento solar de la superficie genera mezcla en el aire contiguo al suelo, propiedad que se va transmitiendo hacia niveles superiores en la medida que el calentamiento progresa, lo cual socava la inversión radiativa. Sin embargo, al ponerse el sol, comienza nuevamente el enfriamiento de la superficie, y con ello, comienza a cambiar el perfil de temperatura, generándose nuevamente la inversión radiativa y la estabilidad en el aire.

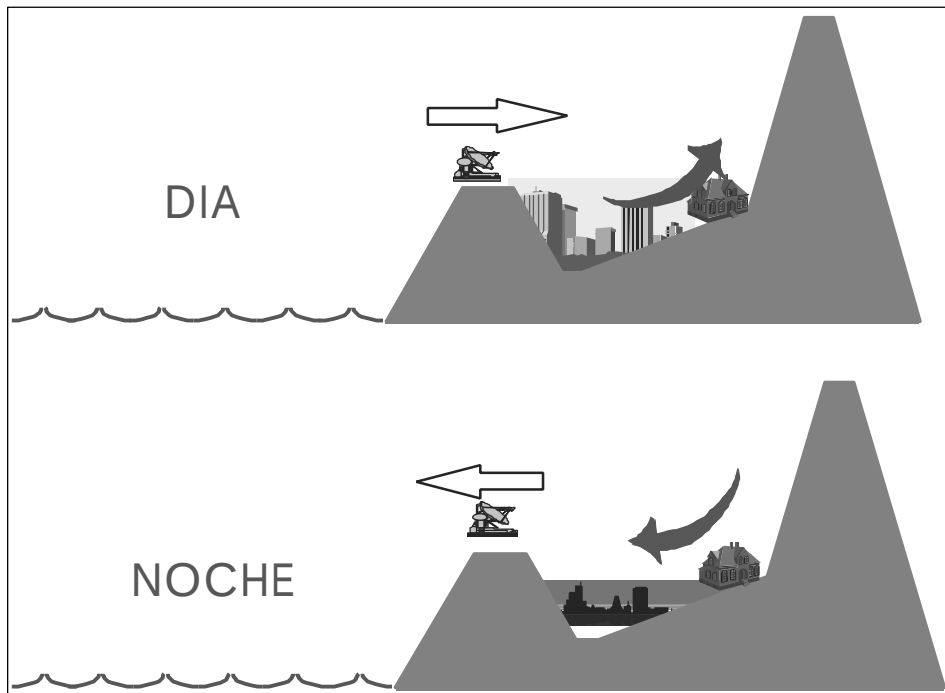
Sistema de brisas

El calentamiento diferencial de las superficies del mar y del continente genera la brisa mar-tierra. Durante el día, el calentamiento más rápido de la masa continental induce un ascenso de aire, el cual deja un vacío que viene a ser llenado por aire más frío marino. Durante la noche, la superficie continental se enfría más rápidamente que la superficie del mar, por lo cual el aire se dirige del continente al mar.

El mismo principio se aplica al calentamiento diferencial entre el valle y la ladera de los cerros circundantes, produciéndose una brisa desde el valle a la montaña durante el día, y de la montaña al valle durante la noche. Así, a través del día, en la cuenca de Santiago se observa una brisa que mueve la masa de aire hacia el sector oriente de la ciudad, encauzándose por los cajones de los ríos Maipo y Mapocho, mientras por la noche el sentido se invierte, y el aire se mueve hacia el poniente. Este comportamiento de los flujos de aire se muestra esquemáticamente en la figura 1.1.

Como se dijo anteriormente, la brisa diurna invernal es más moderada que la brisa diurna estival, por lo que el alcance de la masa de aire contaminada es mayor en verano que en invierno.

Figura 1.1. Presentación esquemática de brisas mar-continente y valle-montaña.



1.2. Episodios de contaminación invernal

Sin embargo, el patrón típico de circulación descrito anteriormente se ve alterado en algunos periodos por la ocurrencia de un fenómeno meteorológico de meso-escala (cientos de kilómetros) denominado vaguada costera. De acuerdo a las investigaciones desarrolladas por el Departamento

de Geofísica de la Universidad de Chile (Rutllant, J. & R. Garreaud, 1995), cerca del 90% de los episodios de contaminación invernal se relaciona con la ocurrencia de estos fenómenos. Las condiciones sinópticas asociadas son definidas por los investigadores como de tipo anticiclónico (A) o de baja pre-frontal (BPF), siendo sus rasgos distintivos los siguientes (CENMA, 1998):

Configuración tipo A

Aproximadamente un 60% de los episodios por MP10 responde a esta configuración sinóptica. Se caracteriza por la irrupción de una dorsal cálida (altas presiones) en la tropósfera media sobre la Zona Central, que reemplaza a una vaguada en altura cuyo eje presenta frecuentemente una orientación NW-SE. En sincronía a esta condición de altura se produce en niveles bajos la formación de una zona de baja presión entre la alta subtropical por el oeste y un centro de alta presión frío de carácter migratorio que se ubica al este de la cordillera de Los Andes. Bajo estas condiciones la cuenca presenta normalmente cielos despejados, viento del este a niveles bajos (tanto en el día como en la noche), una marcada oscilación térmica diaria y descenso en la humedad relativa.

La persistencia de una componente de viento del este, así como el reforzamiento de la inversión térmica, se traduce en una marcada estabilidad del aire en la cuenca y en un pronunciado empeoramiento de las condiciones de calidad por material particulado en el sector poniente de la ciudad, como se muestra en la figura 1.2, en la cual se observa el comportamiento de los índices de material particulado en 4 estaciones de monitoreo de calidad de aire, apreciándose los máximos en la estación de Pudahuel.

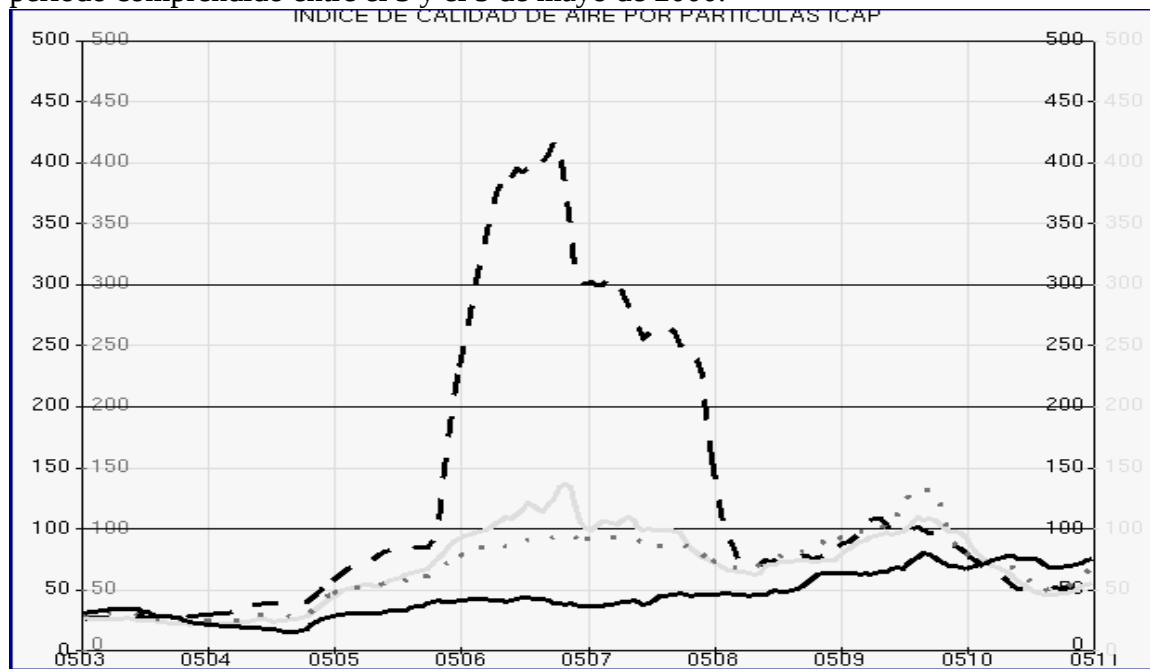
La etapa final de la vaguada costera se caracteriza por el ingreso de aire marino saturado a la cuenca, la ocurrencia de viento oeste y el debilitamiento de la inversión térmica, rasgos que permiten una mejor mezcla del aire y una disminución de los niveles de material particulado.

Configuración Tipo BPF

Aproximadamente un 30% de los episodios responde a esta configuración. Se caracteriza por la irrupción de una vaguada en la tropósfera media, acompañando a un sistema frontal débil u ocluido, que pierde energía a medida que se aproxima a la cuenca de Santiago. Se distingue un centro de baja presión al este de la cordillera de Los Andes, y frecuentemente, una alta fría migratoria desplazada sobre el Atlántico. Esta condición está normalmente asociada a cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y oscilación térmica diaria moderada o débil.

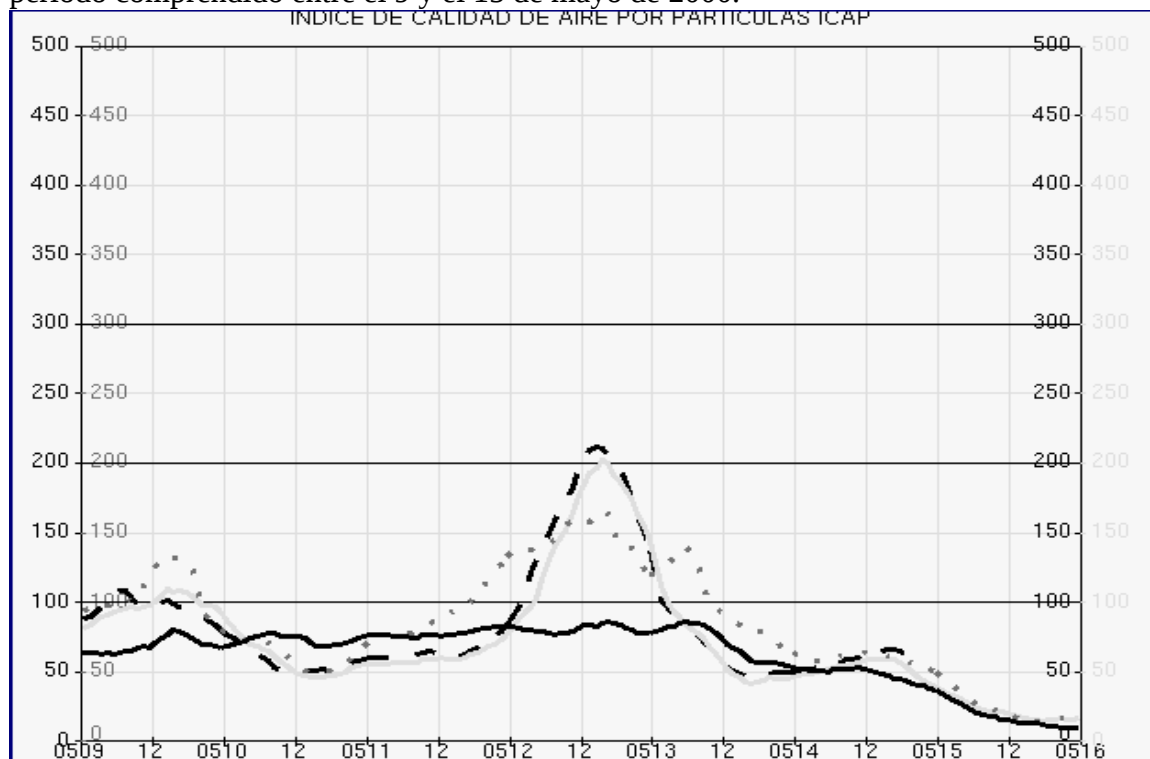
Durante este tipo de episodios los niveles de material particulado generalmente aumentan en forma homogénea en toda la cuenca, alcanzándose valores más moderados que en los episodios tipo A (ver Figura 1.3).

Figura 1.2. Índices de calidad de aire por partículas en las estaciones de Pudahuel (trazos), Parque O'Higgins (continua gris), La Florida (punteada) y Las Condes (continua negra), para el periodo comprendido entre el 3 y el 5 de mayo de 2000.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de SESMA

Figura 1.3. Índices de calidad de aire por partículas en las estaciones de Pudahuel (trazos), Parque O'Higgins (continua gris), La Florida (punteada) y Las Condes (continua negra), para el periodo comprendido entre el 9 y el 15 de mayo de 2000.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de SESMA

Es posible la ocurrencia de episodios múltiples o mixtos, en los cuales se produce alternancia de configuraciones A y BPF, con cortos períodos de remisión o relajación intermedios del orden de 24 horas. Normalmente estos episodios mixtos comienzan con una configuración sinóptica tipo A, seguida de una condición tipo BPF.

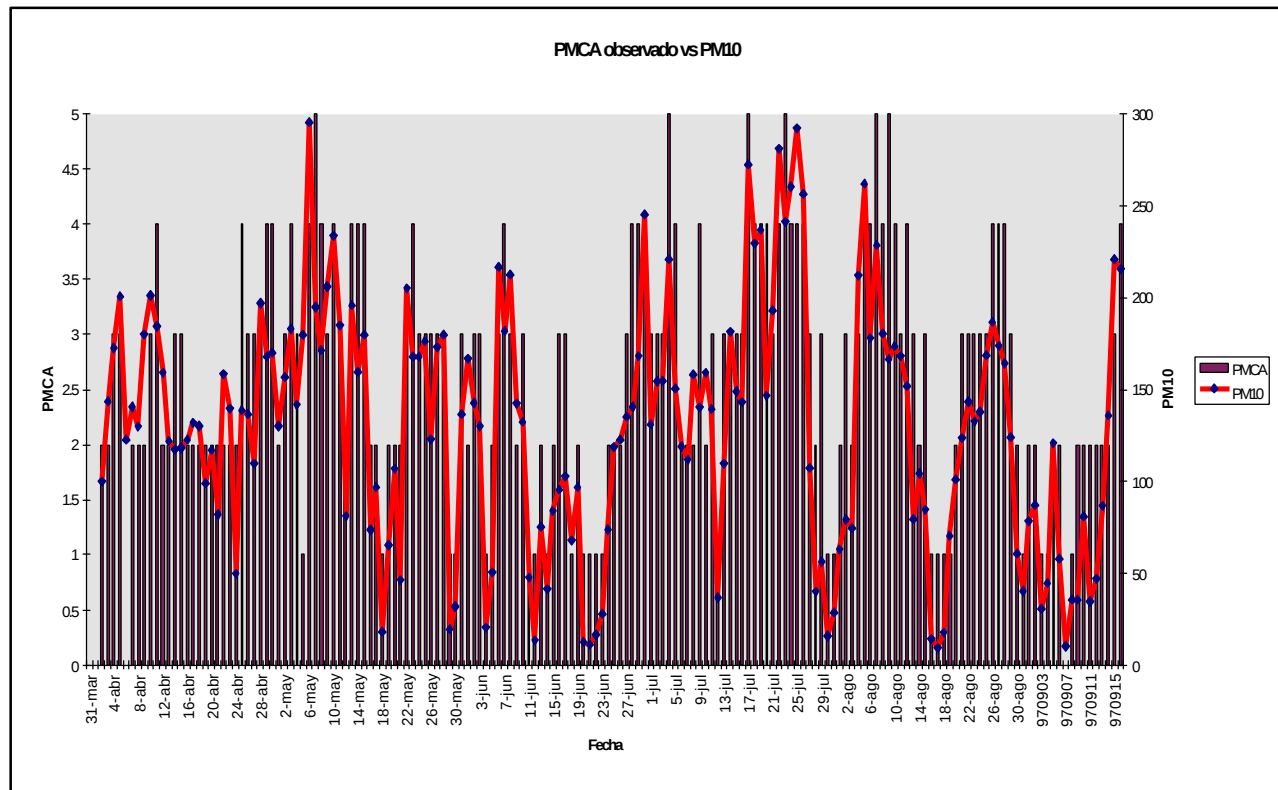
1.3. Pronóstico meteorológico

Por encargo de CONAMA, CENMA realiza diariamente el pronóstico de las condiciones meteorológicas de la Zona central, con orientación a la dispersión de contaminantes. La operación del sistema de pronósticos meteorológicos es realizada en forma ininterrumpida entre el 15 de marzo y el 17 de septiembre por un equipo de tres meteorólogos, quienes cuentan con el apoyo del equipo profesional a cargo de la mantención y operación de la red meteorológica y de profesionales a cargo de la recepción y procesamiento computacional de la información. La rutina operacional contempla los siguientes aspectos:

- Recepción en tiempo real y análisis de información de la red meteorológica local.
- Recepción en tiempo real y análisis de información de la red de monitoreo de calidad de aire.
- Análisis de productos numéricos meteorológicos disponibles en Internet.
- Recepción y análisis de la información meteorológica de carácter sinóptico enviada por la Dirección Meteorológica de Chile.
- Cálculo de parámetros de estabilidad atmosférica.
- Operación de modelo de pronóstico de advección costera.
- Discusión con meteorólogos de turno del Centro de Análisis y Pronósticos de la Dirección Meteorológica de Chile
- Elaboración de 3 Informes diarios: dos matinales y uno vespertino.

Con esta información, los meteorólogos generan además el pronóstico de un indicador denominado Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), el cual se determina a partir del análisis de las condiciones meteorológicas actuales y pronosticadas que afectan la región, según los procedimientos descritos en la descripción del modelo de predicción desarrollado por CONAMA (1998). Este indicador ha mostrado un nivel de asociación alto con la evolución de los promedios de material particulado en la cuenca, como se puede apreciar en la figura 1.4.

Figura 1.4. Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica observado versus promedio diario de material particulado respirable constatado en la cuenca de Santiago para el periodo invernal 1999.



Fuente: CENMA

1.4. Pronóstico de calidad de aire por material particulado

Durante 1998, CONAMA encargó un estudio para mejorar la metodología de pronóstico de calidad de aire en la Región Metropolitana. La descripción de la metodología con que se construyó el modelo se encuentra en el documento “Improvement of the Forecast of Air Quality and the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region”, que fue desarrollado por el consultor Joseph Cassmassi, meteorólogo senior del Distrito de Calidad de Aire de la Costa Sur de California (Cassmassi, 1999), disponible al público en CONAMA.

El modelo desarrollado (de aquí en adelante modelo *Cassmassi*) pronostica el valor máximo de concentración promedio de 24 horas de material particulado respirable MP10, esperado para el día siguiente, en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Santiago, clasificadas como estaciones con representatividad poblacional.

La metodología desarrollada está basada en algoritmos de cálculo desarrollados mediante la aplicación de técnicas estadísticas de variables múltiples, enfocadas a encontrar relaciones entre posibles variables predictoras y la variable a predecir. La variable a predecir es la concentración máxima promedio de 24 horas del día siguiente. Los posibles predictores incluyen variables meteorológicas observadas, índices de condiciones meteorológicas observadas y pronosticadas,

concentraciones observadas, índices de variaciones esperadas de emisiones y otros, como se describe en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Variables predictoras utilizadas en el modelo de pronóstico de calidad de aire por material particulado.

Tipos de variables	Especificaciones
Variables relacionadas con emisiones	• Día de la semana • Índice de día feriado/no feriado • Factor de cambio de concentraciones según día de la semana usando el modelo CONAMA 98 • Factor de cambio de concentraciones según día de la semana específico para cada estación de monitoreo
Variables de calidad de aire (MP10) para cada estación de monitoreo	• Concentración máxima de 24 horas observada el día anterior • Concentración promedio 24 horas observada a las 10 horas del día actual • Cambios de Concentraciones medias de 24 horas, observados a las 10 horas (en la última hora, últimas 3 horas, últimas 6 horas)
Variables meteorológicas obtenidas del radiosondeo cercano a Santiago (Quintero, Santo Domingo), realizado a las 12 UTC del día actual	• Altura, temperatura, humedad, viento, observados a niveles estándar de presión (100 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa) • Altura, presión, temperatura de la base y del tope de la capa de inversión térmica cercana a la superficie. • Variables derivadas de las anteriores (espesores, diferencias con el día anterior)
Condiciones meteorológicas de escala sinóptica y regional	• Índice de potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica para el día actual • Índice de Potencial meteorológico de Contaminación Atmosférica pronosticado para el día siguiente
Variables a pronosticar (para cada una de las estaciones monitoras)	• Concentración máxima de 24 horas de MP10 esperada para el día siguiente

Los métodos estadísticos utilizados en la construcción del modelo fueron los siguientes:

- Regresión lineal múltiple usando las variables agregadas según modelo de pronóstico de CONAMA 1998 (concentraciones actuales multiplicadas por cambio esperado según día de la semana, tendencia de las concentraciones en la última hora, cambio pronosticado de condiciones meteorológicas).
- Regresiones lineales múltiples paso a paso, usando todas las variables primitivas del modelo de CONAMA 1998 o un subconjunto de ellas.
- Regresión lineal múltiple usando sólo variables observadas (meteorología de altura, concentraciones observadas, cambios esperados de concentraciones según día de la semana).
- Regresión lineal múltiple usando variables observadas y potencial meteorológico pronosticado.

- Estratificación previa por día de la semana (día laboral, fin de semana), regresión múltiple.
- Estratificación previa por temperatura y humedad en niveles bajos del sondeo (925, 850 hPa) y regresión múltiple.
- Estratificación previa por altura de capa de inversión térmica, regresión múltiple.
- Estratificación previa usando un índice objetivo de condición meteorológica, regresión lineal múltiple.

La aplicación de los diferentes métodos estadísticos da como resultado un gran número de ecuaciones predictivas para cada estación de monitoreo (27 ecuaciones por estación).

Las ecuaciones de pronóstico fueron desarrolladas con la información disponible para los años 1997 y 1998. El período correspondiente al año 1999 fue usado para validar dichas ecuaciones.

Evaluación de los algoritmos de predicción

De acuerdo a los requisitos planteados en la normativa, el pronóstico de calidad de aire debe ser confiable, en cada estación de monitoreo, en un 65% de los días del período válido de aplicación. El acierto del pronóstico se calcula usando los niveles de concentración que definen diferentes grados de emergencia.

La validación de las ecuaciones de pronóstico obtenidas mediante la aplicación de las diferentes técnicas estadísticas, cumple con el criterio anterior.

Debido al gran número de ecuaciones encontradas en cada estación de monitoreo, se aplicó un método para seleccionar las ecuaciones de pronóstico que entregan mejores resultados. Se utilizó un método de asignación de puntajes para calificar la bondad del ajuste del pronóstico, que incluye varios aspectos adicionales al 65% que exige la normativa:

- Porcentaje de exactitud de la predicción, basado en la comparación de niveles pronosticados con niveles observados.
- Error medio absoluto de la predicción (desviación con respecto a las observaciones).
- Porcentaje de pronósticos que están dentro de un rango de error prefijado.
- Porcentaje de pronósticos que están dentro de un rango de error prefijado, cuando ocurre un cambio significativo de concentraciones de un día a otro.
- Porcentaje de exactitud del pronóstico, para los niveles más altos (condiciones de pre-emergencia o emergencia).

La aplicación de esta metodología de evaluación permitió jerarquizar los algoritmos encontrados, ordenándolos de acuerdo al mayor puntaje obtenido al considerar diferentes formas de medir su comportamiento.

La evaluación independiente realizada por Fuenzalida (2000) utiliza la información del período que se extiende desde el 1° de abril al 17 de septiembre de 1999. La validación muestra que todos los modelos cumplen con el requisito legal de acierto y confirma los modelos sugeridos por el consultor.

Algoritmos de predicción propuestos para cada estación monitora

Se seleccionaron dos algoritmos de predicción para cada estación monitora.

Un primer algoritmo incluye el índice de potencial meteorológico pronosticado para el día siguiente; el segundo algoritmo está basado solamente en observaciones (del mismo día y del día anterior).

La tabla 1.2 muestra las ecuaciones correspondientes a los algoritmos de cada estación. Las variables incorporadas en los cálculos se explican más adelante.

Tabla 1.2. Ecuaciones de pronóstico para cada estación de monitoreo de material particulado MP10 con representatividad poblacional.

Estación F La Paz <u>Ecuación 1: Regresión múltiple con variables originales del modelo CONAMA</u> $NC-B = 60.7 + 17.7 * DIFF - 17.8 * EMIS2 + 16.5 * FTND + 0.73 * FPM10$ <u>Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica</u> <i>BASESANT</i> ≤ 5000 m $HSB24O = 87.0 + 0.53 * DH500 - 0.29 * DTHICK + 0.59 * FE1 - 0.46 * AVGRH + 14.1 * FTND$ <i>BASESANT</i> > 5000 m $HSB24O = 118.7 - 1.21 * FPM10 - 0.79 * FF925 + 1.66 * FE1 - 0.72 * RH925$
Estación L La Florida <u>Ecuación 1: Regresión múltiple con tendencias de concentraciones específicas por estación y potencial meteorológico pronosticado.</u> $MPP-A = 58.0 + 15.4 * DIFF + 0.31 * LE1 + 24.2 * LTND + 0.32 * LPM10$ <u>Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica</u> <i>BASESANT</i> ≤ 5000 m $HSB24O = 62.1 + 2.65 * T900 + 0.25 * DH500 + 0.45 * LE1$ <i>BASESANT</i> > 5000 m $HSB24O = 176.0 + 0.38 * LE1 - 1.43 * RH925 + 25.1 * LTND$
Estación M Las Condes <u>Ecuación 1: Regresión múltiple con variables observadas y potencial pronosticado</u> $HNS24S = 4.6 + 6.9 * MI1 - 4.34 * T925 - 0.79 * FF850 + 2.09 * THICK - 0.03 * DDD925 + 0.48 * ME1 - 0.45 * RH925$ <u>Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica</u> <i>BASESANT</i> ≤ 5000 m $HSB24O = 60.0 + 0.04 * DDP925 + 0.62 * ME1 - 0.23 * AVGRH$ <i>BASESANT</i> > 5000 m $HSB24O = 68.0 - 0.77 * MPM10 + 3.44 * T900 - 1.26 * FF850 + 1.08 * ME1 - 0.47 * AVGRH$

Continuación Tabla 1.2.

Estación N Parque O'Higgins

Ecuación 1: Modelo CONAMA

$$\text{CONAMA} = \text{NPM10} * \text{EMIS2} + 45 * \text{DIFF} + 22.5 * \text{NTND}$$

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica

$$\text{BASESANT} \leq 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 109.9 - 1.25 * \text{FF850} + 1.85 * \text{DELTAT} + 0.23 * \text{DH500} + 0.45 * \text{NE1} - 0.51 * \text{AVGRH} + 17.4 * \text{NTND}$$

$$\text{BASESANT} > 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 125.9 - 1.25 * \text{NPM10} + 0.22 * \text{DH500} + 1.64 * \text{NE1} - 0.79 * \text{AVGRH}$$

Estación O Pudahuel

Ecuación 1: Regresión múltiple con variables observadas y potencial pronosticado

$$\text{HNS24S} = -21.7 + 39.4 * \text{MI1} + 0.33 * \text{OPM10} + 2.06 * \text{T925} + 0.21 * \text{DH500}$$

Ecuación 2: Estratificación según condición meteorológica

Configuración 1

$$\text{YSI24O} = 90.8 - 1.556 * \text{FF850} + 0.48 * \text{OE1}$$

Configuración 2

$$\text{YSI24O} = 29.0 + 0.44 * \text{OPM10} + 6.32 * \text{T925} + 1.53 * \text{DH500} - 1.05 * \text{DTHICK}$$

Configuración 3

$$\text{YSI24O} = 159.7 + 0.58 * \text{DH500} + 0.40 * \text{OE1} - 0.99 * \text{AVGRH}$$

Estación P Cerrillos

Ecuación 1: Modelo CONAMA

$$\text{CONAMA} = \text{PPM10} * \text{EMIS2} + 45 * \text{DIFF} + 22.5 * \text{PTND}$$

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica

$$\text{BASESANT} \leq 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 117.2 + 0.76 * \text{DH500} - 0.40 * \text{DTHICK} + 0.52 * \text{PE1} - 0.58 * \text{RH925}$$

$$\text{BASESANT} > 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 150.1 + 0.58 * \text{DH500} - 0.56 * \text{DTHICK} + 0.40 * \text{PE1} - 1.23 * \text{AVGRH}$$

Estación Q El Bosque

Ecuación 1: Regresión múltiple con tendencias de concentraciones específicas por estación y potencial meteorológico pronosticado.

$$\text{MPP-A} = 52.9 + 12.8 * \text{DIFF} + 0.66 * \text{QE1}$$

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica

$$\text{BASESANT} \leq 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 100 + 0.30 * \text{DH500} + 0.56 * \text{QE1} - 0.59 * \text{RH925} + 19.0 * \text{QTND}$$

$$\text{BASESANT} > 5000 \text{ m}$$

$$\text{HSB24O} = 197.9 - 1.42 * \text{AVGRH}$$

Tabla 1.3. Descripción de las variables usadas en las ecuaciones de pronóstico

Variable	Unidades	Descripción
AVGRH	%	Humedad relativa promedio 850-925 hPa a las 12 UTC
BASESANT	metros	Altura de la base de la capa de inversión térmica sobre Santiago, a las 12 UTC
DDD925	grados	Cambio en 24 h de la Dirección del Viento del nivel 925 hPa, a las 12 h
DDP925	hPa	Cambio en 24 h de la Depresión del Punto de Rocío del nivel 925 hPa, a las 12 h
DELTAT	C	Diferencia de temperatura entre el tope y la base de la capa de inversión, a las 12 UTC
DH500	metros	Cambio en 24 h de la altura del nivel 500 hPa, a las 12 h
DTHICK	metros	Cambio en 24 h del espesor 500-1000 hPa, a las 12 UTC
FF850	nudos	Velocidad del viento del nivel 850 hPa a las 12 UTC
FF925	nudos	Velocidad del viento del nivel 925 hPa a las 12 UTC
RH925	%	Humedad relativa del nivel 925 hPa a las 12 UTC
T900	C	Temperatura del nivel 900 hPa a las 12 UTC
T925	C	Temperatura del nivel 925 hPa a las 12 UTC
THICK	metros	Espesor 500-1000 hPa a las 12 UTC
MI1		Indice de Potencial Meteorológico pronosticado para el día siguiente
DIFF		Diferencia entre el índice de potencial meteorológico pronosticado para el día siguiente y el índice del día actual
EMIS2		Factor de cambio de las concentraciones según día de la semana usado en el modelo CONAMA ($1 + [\text{cambio de conc}]/100$)
FE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones según día de la semana, estación La Paz
FPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación La Paz
FTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación La Paz
LE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones según día de la semana, estación La Florida
LTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación La Florida
ME1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Las Condes
MPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación Las Condes
NE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Parque O'Higgins
NPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación Parque O'Higgins
NTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación Parque O'Higgins
OE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Pudahuel
OPM10	µg/m3	Concentración de MP10 promedio 24 h a las 10 h, estación Pudahuel
PE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Cerrillos
PPM10	µg/m3	Concentración de MP10 promedio 24 h a las 10 h, estación Cerrillos
PTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación Cerrillos
QE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación El Bosque
QTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación El Bosque

Todos los resultados obtenidos con las ecuaciones corresponden a concentraciones máximas promedio de 24 h de MP10, pronosticadas para el próximo día, expresadas en (µg/m3).

La nomenclatura empleada para la variable a calcular (lado izquierdo de las ecuaciones) está asociada al método estadístico usado por el consultor para obtener cada ecuación.

Aplicación operacional del modelo

La aplicación diaria de las ecuaciones de pronóstico de calidad de aire requiere disponer de información actualizada de concentraciones de material particulado respirable MP10, variables meteorológicas de altura y potencial meteorológico actual y pronosticado.

Concentraciones de material particulado respirable MP10

La información base corresponde a valores promedio para 1 h. A partir de esa información, se calculan los promedios para períodos de 24 h y las tendencias de las concentraciones promedio de 24 h.

Los promedios de 24 h se calculan cuando el número de horas con información es igual o superior a 18. En caso que el número de horas con información fuera menor a 18, no se calculan promedios de 24 h.

Variables meteorológicas de altura

La información base proviene del radiosondeo diario de las 12 UTC disponible para la zona central del país, realizado en el lugar más cercano a la cuenca de Santiago por la Dirección Meteorológica de Chile. Algunas variables usadas en las ecuaciones de pronóstico se calculan directamente de la información base.

En caso que la información del radiosondeo de las 12 UTC no esté disponible en el momento de preparar el pronóstico, se utilizará la información de la medición anterior, extrapolada a la hora 12 UTC, o la información de estaciones cercanas, de acuerdo a procedimientos usualmente aplicados en los servicios de pronóstico meteorológico.

Prioridad de las ecuaciones de pronóstico

De acuerdo a la jerarquización de las ecuaciones de pronóstico propuestas y las recomendaciones del consultor, el pronóstico de calidad de aire estará basado en la primera ecuación propuesta. En caso que no fuera posible aplicar esa ecuación por falta de información, se utilizará la segunda ecuación propuesta.

1.4. Referencias bibliográficas

1. Rutllant, J. & R. Garreaud, 1995: "Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Forecasting", *Environmental Monitoring and Assessment* 34: 223-244.
2. Cassmassi, J.C., 1999: "Improvement of the Forecast of Air Quality and of the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region". Technical Reports No.1, 2, 3. Submitted to: National Commission of the Environment, Metropolitan Region, Santiago, Chile.
3. CENMA, 2000, Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, Informe interno para CONAMA.
4. CENMA, 1998, Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, Informe Final para CONAMA, Anexos Técnicos Vol. 1.
5. CONAMA 1998, "Modelo predictor de calidad de aire para Material Particulado Respirable MP10". Informe Técnico. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana.
6. Fuenzalida, H, 2000: "Evaluación de los Informes Técnicos No. 2 y 3, Mejoramiento del pronóstico de calidad del aire y del conocimiento de las condiciones meteorológicas locales de la Región Metropolitana". Informe Técnico. Preparado para Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana, Santiago, Chile.

Capítulo 2

“Evolución de la calidad del aire en la Región Metropolitana e inventario de emisiones”

Expositor: Jorge Cáceres Tonacca

Resumen

La red de monitoreo de calidad de aire MACAM del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA) se oficializó en 1988, comprendiendo 5 estaciones, y fue renovada y ampliada a 8 estaciones en 1997 (red MACAM2). Ello ha permitido caracterizar la contaminación en nuevos sectores de la ciudad, demostrando que el monitoreo previo a 1997, concentrado en el centro de la ciudad, no se encontraba midiendo la calidad del aire en las zonas donde se registran las mayores concentraciones de MP10 y CO (sur-poniente).

El análisis de la información proveniente de esta red indica que la evolución de la calidad del aire de la ciudad de Santiago muestra una importante mejoría en la última década para la totalidad de los contaminantes normados en Chile, con la sola excepción del ozono. De ellos, el monóxido de carbono muestra la principal disminución, con una reducción de 60 días sobre norma en 1995, a 22 días durante 1998. Una situación parecida ocurre con el material particulado respirable (MP10). En aquellas estaciones en que es factible hacer comparaciones de largo plazo, i.e., pertenecientes a la red MACAM, los días sobre norma han disminuido de 57 a 35 entre 1995 y 1998. Por su parte, los días sobre nivel 300 ICAP, que define situaciones de pre- emergencia ambiental, han bajado de 9 a 0 en las mismas estaciones e igual periodo. Importante es señalar que el MP10 es el único contaminante por el cual se han declarado situaciones de emergencia en la ciudad.

Es conveniente indicar que el material particulado respirable está constituido por una mezcla de partículas directamente emitidas a la atmósfera y de otras formadas en el aire por la transformación química de gases precursores (partículas secundarias), encontrándose los compuestos más agresivos para la salud en una mayor proporción en la fracción fina del material particulado (PM_{2,5}, es decir, partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 µm).

El principal logro del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) de la Región Metropolitana ha sido la evolución de las concentraciones del material particulado respirable, en especial de la fracción más agresiva para la salud. Se ha observado una clara disminución en el MP10 a lo largo del tiempo en que se ha monitoreado este contaminante, la que es motivada principalmente por una reducción de las concentraciones de su fracción fina, que ha alcanzado un valor del orden de un 35% en 6 años.

Parte de la responsabilidad de las distintas fuentes emisoras en las concentraciones de contaminantes observadas en la atmósfera puede estimarse a partir del inventario de emisiones de la región. Al respecto, y en forma muy resumida, es posible indicar que las fuentes estacionarias representan el 75% de las emisiones directas de MP10, siendo la mitad de ellas provenientes de fuentes industriales. Por su parte, las fuentes móviles aparecen como responsables de las emisiones de CO (90%) y dentro de éstas, los vehículos gasolineros concentran el 96% de las emisiones. También las fuentes móviles son responsables de la mayor parte de las emisiones (82%) de NO_x (precursor de MP10 y ozono), aunque en este caso son los vehículos diesel los de mayor contribución en la categoría (60%).

Capítulo 2

La Calidad de Aire y el inventario de emisiones de la Región Metropolitana

2.1. Calidad del aire en Santiago

La red de monitoreo de calidad de aire MACAM se oficializó en 1988, comprendiendo 5 estaciones, y fue renovada y ampliada a 8 estaciones en 1997 (red MACAM2). Ello ha permitido caracterizar la contaminación en nuevos sectores de la ciudad, demostrando que el monitoreo previo a 1997, concentrado en el centro de la ciudad, no se encontraba midiendo la calidad del aire en las zonas donde se registran las mayores concentraciones de MP10 y CO (sur-poniente).

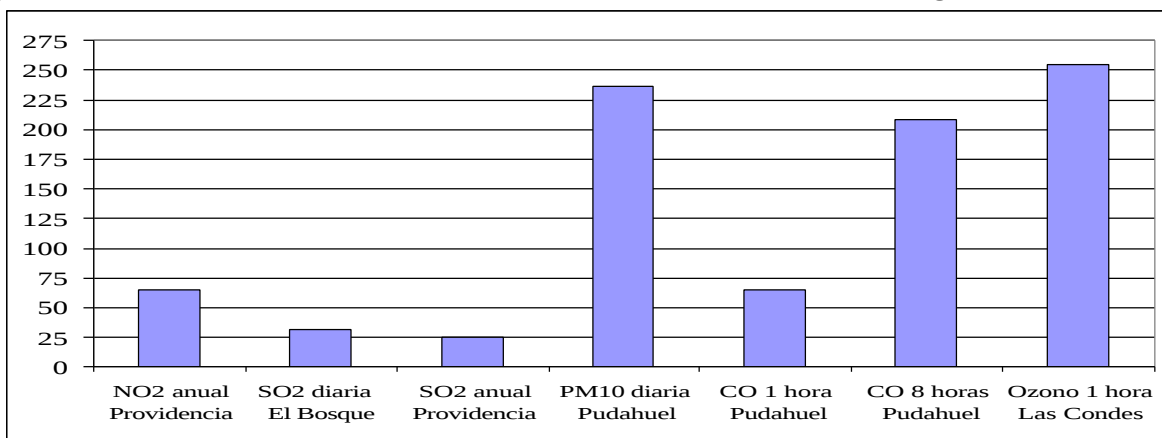
Los análisis mostrados a continuación se basan en la información de calidad de aire de 1995 y de 1998, selección que permite la comparación con los antecedentes que se usaron para declarar a la Región Metropolitana como Zona Saturada (1995), y que eran los más recientes completos y validados (1998).

Como se aprecia en la figura 2.1, el año 1998 se superaron en Santiago las normas de calidad de aire para tres contaminantes: material particulado respirable (MP10, promedio de 24 horas), monóxido de carbono (CO, promedio de 8 horas) y ozono (O₃ promedio de 1 hora). De estos, el que alcanza un mayor nivel sobre norma es ozono; 2.5 veces el valor de la norma.

Sin embargo, por sus características, es el material particulado respirable el que alcanza los niveles más agresivos para la salud de la población, siendo el único contaminante por el cual se han declarado situaciones de emergencia en la ciudad.

Por su parte, el dióxido de nitrógeno (NO₂, promedio anual) se encuentra en 65% de la norma, situación que no significa que se ha subsanado la condición de latencia declarada para dicho contaminante en 1996. El valor presentado corresponde sólo a un punto de la ciudad (Providencia) por lo que se requiere esperar a los resultados de otras localizaciones antes de tener una evaluación adecuada.

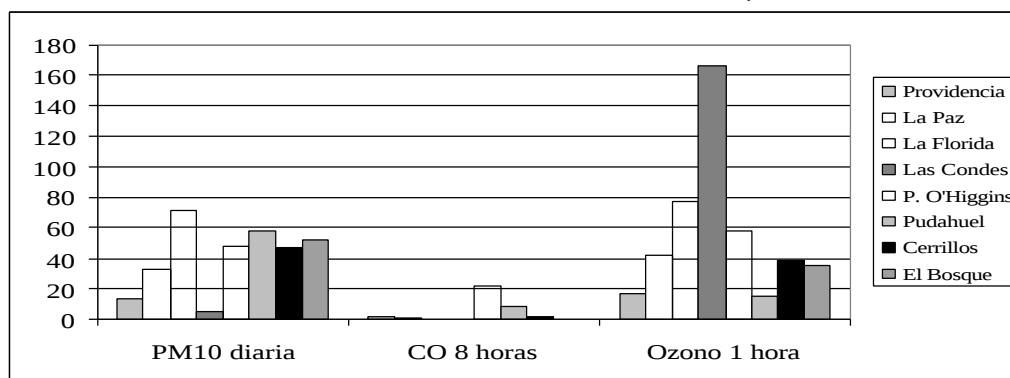
Figura 2.1: Porcentaje de la norma de calidad de aire alcanzado por los máximos valores registrados en 1998 en la Red MACAM2. Se señala la estación en la cual se registró dicho valor.



Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA, excepto NO₂ obtenido de monitor DOAS.

De acuerdo a la figura 2.2, es el ozono el contaminante más persistente durante el año, con superación de norma en todas las estaciones. Además, presenta marcadas diferencias espaciales, registrándose tanto las máximas concentraciones horarias (408 ug/m³), como el mayor número de días sobre norma (166) en la estación Las Condes. Este comportamiento diferenciado es causado por los mecanismos de formación de ozono que aumentan su concentración a las horas de mayor insolación viento abajo de donde se producen las emisiones de sus precursores.

Figura 2.2: Días sobre normas en las estaciones de la Red MACAM2, durante 1998.

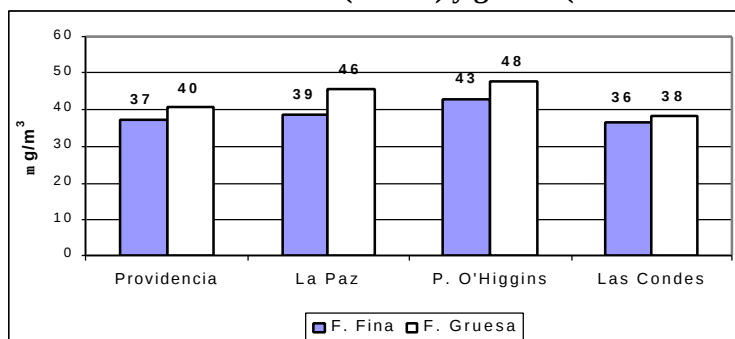


Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA.

El MP10 y el CO también muestran un comportamiento espacial diferenciado, aunque mucho menos marcado que el ozono. Las mayores concentraciones y la mayor ocurrencia de superación de norma se registran en el poniente y surponiente de la ciudad. Ello se debe al patrón de circulación de las masas de aire en la cuenca de Santiago que favorece el transporte nocturno de los contaminantes desde diferentes puntos de la ciudad hacia el sector poniente, lo que sumado al aumento de la inversión térmica que ocurre durante la noche, concentran los contaminantes (CO y MP10 preferentemente) en dichas zonas. La excepción es la estación La Florida que en 1998 presentó una alta ocurrencia de días sobre norma, motivada probablemente por emisiones locales.

La variabilidad espacial de los promedios anuales del MP10 es menor que la de los promedios diarios u horarios. Si se analiza la fracción fina del material particulado (MP2.5, figura 2.3), señalada como la causante principal de los daños en salud, la diferencia entre las estaciones evaluadas es inferior al 20%. Este hecho señala que la exposición prolongada a PM2.5, relacionados con efectos crónicos en salud, es más o menos similar en toda la ciudad.

Figura 2.3: Promedios anuales de fracción fina (MP2.5) y gruesa (MP10–MP2.5) en 1998



Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA de monitor del tipo Dicotómico.

Evolución de la calidad de aire en la Región Metropolitana.

Se ha evaluado la evolución en los últimos años de los contaminantes en las estaciones Parque O'Higgins, La Paz, Providencia y Las Condes, pues cuentan con información previa a 1997. La tabla 2.1 muestra la situación comparada para CO y ozono durante 1998 y 1995, este último periodo usado como antecedente para la declaración de zona saturada de la R.M. en 1996.

Tabla 2.1.-: Número de días sobre norma y máxima concentración (O3: ug/m3, CO: mg/m3) registrada en 1995 y 1998 en las estaciones históricas

Contaminante	Parámetro	Providencia		La Paz		P. O'Higgins		Las Condes	
		1995	1998	1995	1998	1995	1998	1995	1998
Ozono, 1 hora	Días sobre norma	5	17	40	42	30	58	152	166
CO, 8 horas	Días sobre norma	10	2	41	1	60	22	0	0
Ozono, 1 hora	Valor máximo	182	274	274	286	210	284	439	408
CO, 8 horas	Valor máximo	13.3	10.7	12.2	10.8	25.8	15.9	5.8	4.4

Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA.

A partir de 1996 se observa una tendencia clara a la disminución de las concentraciones de CO. Ello puede ser el resultado de la obligatoriedad de la incorporación de vehículos livianos dotados de convertidor catalítico a partir de septiembre de 1992 y a los desincentivos existentes para el uso de vehículos sin convertidor catalítico, especialmente por la aplicación de medidas de restricción vehicular más estrictas, a partir del invierno de 1997, y al aumento de días en el cual se aplican esas restricciones producto de una gestión más preventiva en el manejo de los episodios críticos.

Ello se ha traducido en una disminución adicional de la actividad de la principal fuente de emisión de CO (vehículos sin convertidor catalítico) durante parte importante de los días del invierno, y en particular en aquellos días de peor dispersión de contaminantes. Los factores anteriores han traído menores emisiones de los autos sin convertidor catalítico, ya sea por la vía de la renovación del parque de vehículos, o por el menor uso de los vehículos antiguos.

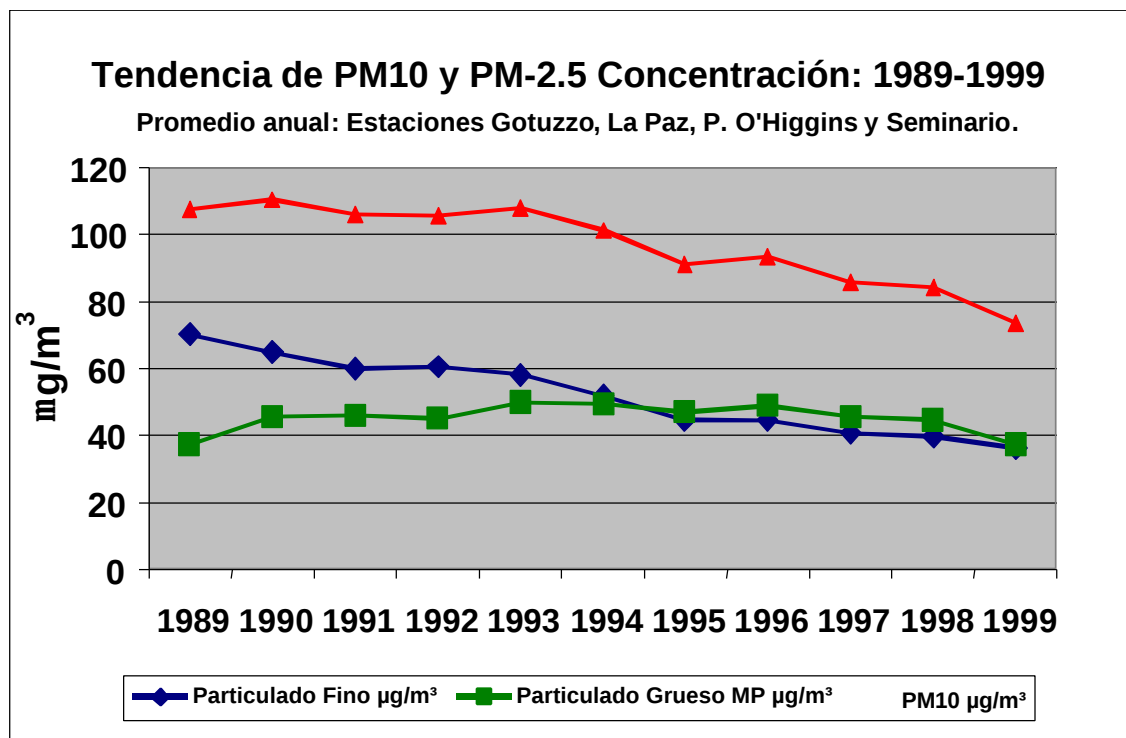
En la tabla 2.1, se observa un creciente número de días sobre norma de ozono en todas las estaciones, aunque los valores máximos no muestran similar comportamiento en la estación más crítica. A partir de 1995, la tendencia promedio de las concentraciones de ozono parece ser al alza, estimándose una pendiente de crecimiento de 5% anual, en cambio los máximos horarios muestran estabilidad en el tiempo.

Las razones de esta diferencia de comportamiento entre promedios y máximos no están del todo claras. De hecho, no se puede concluir con la información que se dispone que las concentraciones de ozono están aumentando en la ciudad o en la región. Si la tendencia a la disminución de las emisiones vehiculares es generalizada, según lo que exhibe el comportamiento de CO, es probable que en lugares más alejados del tráfico vehicular los promedios de ozono puedan inclusive estar disminuyendo, debido a una menor emisión de precursores.

Además, las principales medidas de control de compuestos orgánicos volátiles (precursor de ozono) contempladas en el PPDA aún no entran en su fase operativa.

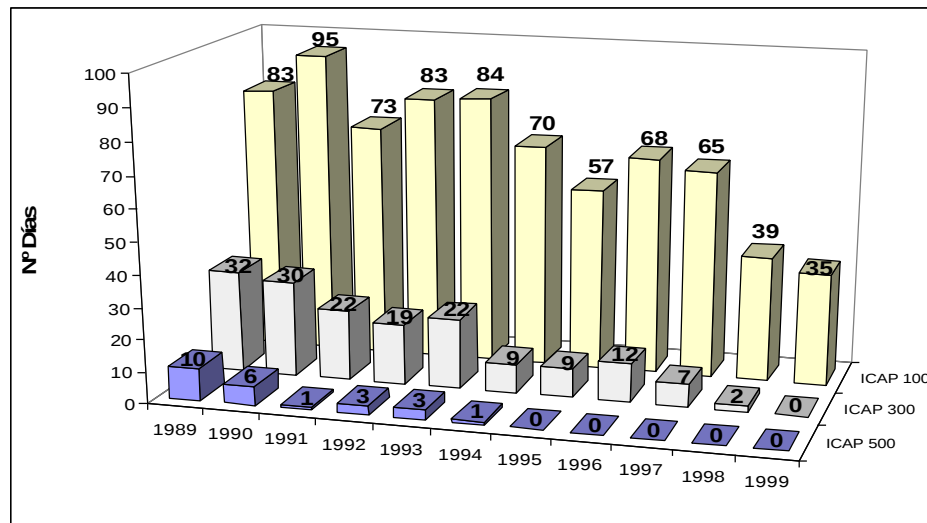
Probablemente, uno de los principales logros en la descontaminación de la ciudad de Santiago sea la evolución de las concentraciones del material particulado respirable, en especial de la fracción más agresiva para la salud (MP2,5). Según se aprecia en la figura 2.4, donde se presentan las concentraciones de MP10, MP2,5 y de la fracción gruesa (MP10 - MP2,5), existe una clara disminución en el MP10 a lo largo del tiempo, la que es motivada principalmente por una reducción de las concentraciones de la fracción fina de dicho contaminante (sobre un 35% en 6 años).

Figura 2.4. Tendencia de promedios anuales de MP10 y sus fracciones fina y gruesa



Ahora bien, la tendencia a la disminución de las concentraciones se visualiza más claramente en el comportamiento de los valores extremos medidos en los últimos años. La figura 2.5 presenta la evolución entre 1989 y 1999 de las superaciones de los niveles 100, 300 y 500 ICAP, equivalentes a 150, 240 y 330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si bien, la tendencia al descenso es clara para los tres niveles, es mucho más marcada la situación de los niveles extremos (ICAP 300 y 500) donde las superaciones en las estaciones históricas prácticamente han desaparecido.

Figura 2.5. Evolución de la cantidad de días sobre 100, 300 y 500 ICAP, en las estaciones históricas de la red MACAM-2 entre 1989 y 1999.



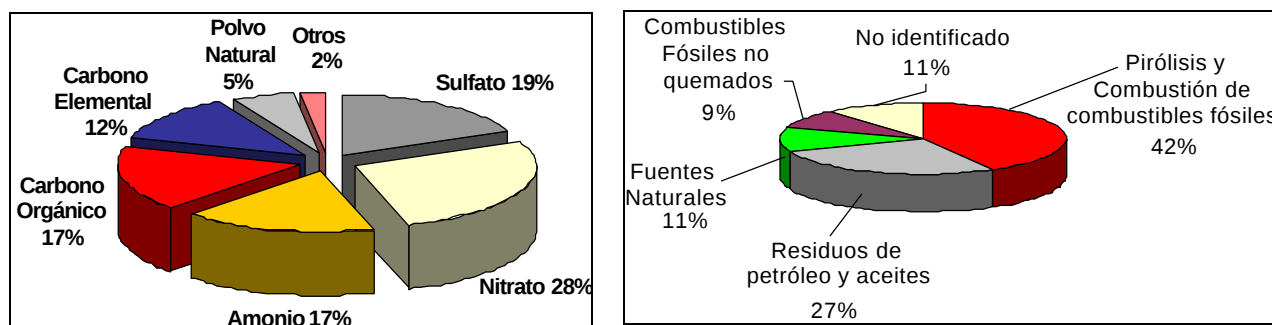
Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA, obtenidos de monitor del tipo Dicotómico.

2.2. Composición del Material Particulado Respirable

El material particulado respirable está constituido de una mezcla de partículas directamente emitidas a la atmósfera y de otras formadas en el aire por la transformación química de gases precursores (partículas secundarias), encontrándose los compuestos más agresivos para la salud en una mayor proporción en la fracción fina del material particulado.

A la izquierda de la figura 2.6 se presenta una estimación de la composición promedio en la ciudad de Santiago del PM_{2.5}, obtenida de análisis realizados entre mediados de julio y fines de agosto de 1998. Se ha encontrado que los aerosoles secundarios (sulfato, nitrato y amonio) son del orden del 60% del PM_{2.5}, el 30% corresponde a compuestos derivados de carbono y el resto a polvo natural y otros elementos como metales. A la derecha de la figura 2.6 se entrega el origen de cada uno de los constituyentes del material particulado orgánico, siendo mayor la proporción de los productos de la pirólisis y la quema de combustibles, seguidos por los residuos de petróleo y aceite, luego vienen aquellos provenientes de las fuentes naturales y los no identificados en igual porcentaje, terminando con la fracción de combustibles fósiles no quemados.

Figura 2.6: Composición promedio del PM2.5 y del material particulado orgánico en Santiago. Julio-Agosto de 1998.



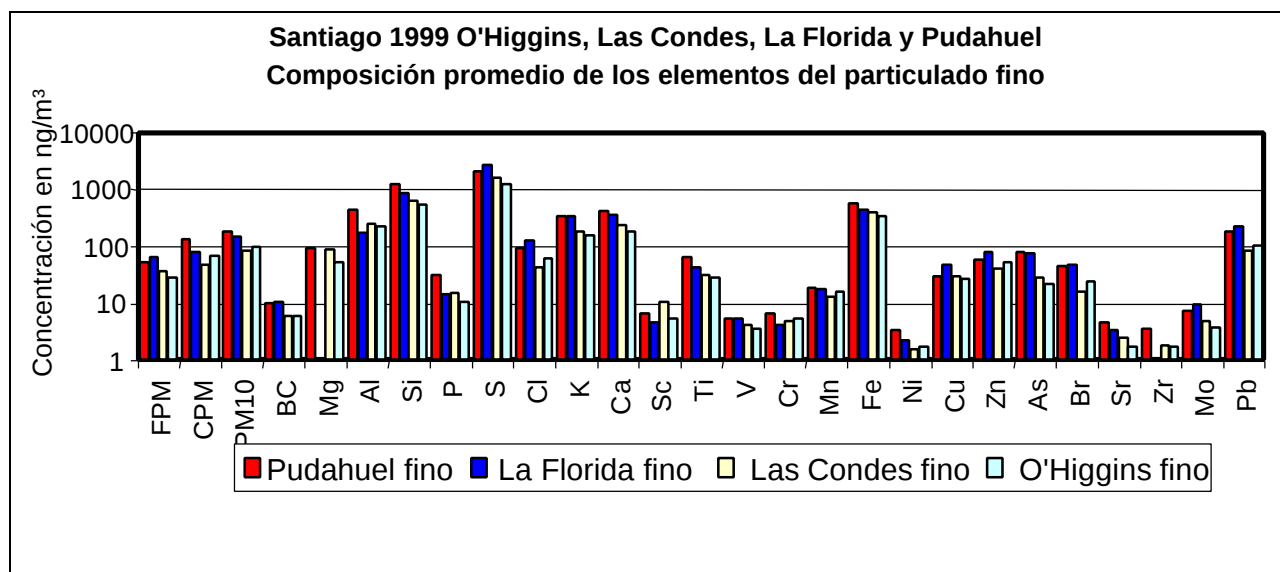
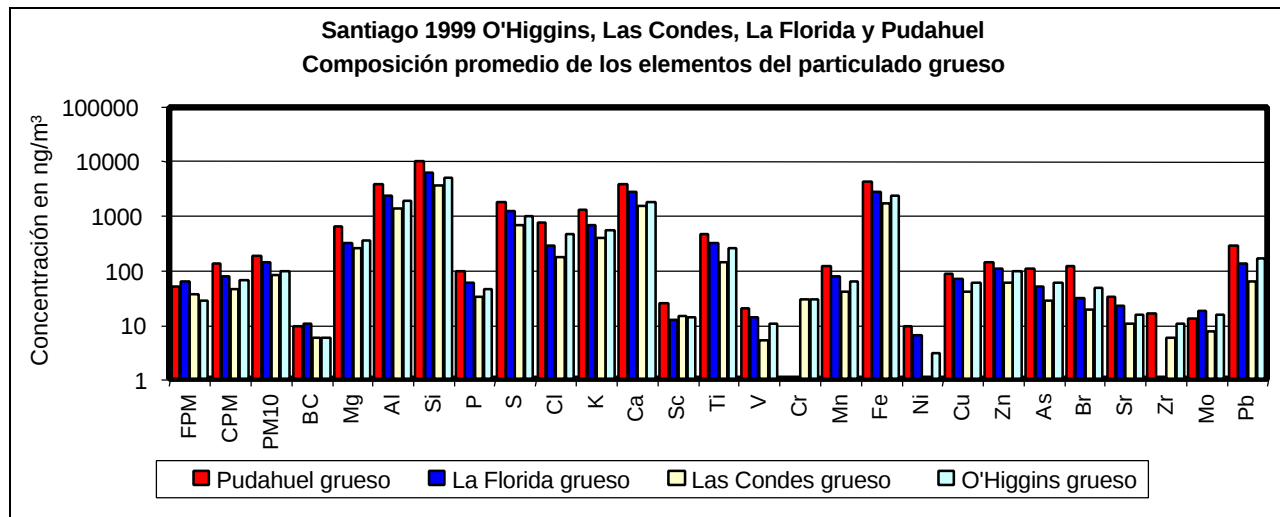
Fuente: elaboración propia.

El carbono orgánico y el carbono elemental son productos de la combustión (combustibles fósiles y biomasa). En el caso del material particulado secundario, el sulfato proviene de transformaciones de emisiones de dióxido de azufre (SO_2), el nitrato de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y el amonio de emisiones de amoníaco (NH_3).

Si bien las proporciones anteriores pueden variar a medida que se mejora el conocimiento de la contaminación atmosférica en Santiago, es claro que el control de los precursores de aerosoles secundarios toma vital importancia si se pretende reducir el impacto del material particulado en la salud de los habitantes. Así mismo, el aporte del polvo natural a ese contaminante es menor del que intuitivamente se creía, no sólo en el PM2.5, sino también en el PM10, donde se estimó entre 15 a 30% para el mismo periodo de la figura.

En la figura 2.7 se entregan los promedios por cada uno de los elementos analizados presentes, tanto en la fracción fina y gruesa recolectados durante la campaña de monitoreo realizada durante el invierno del año 1999. También se entregan los promedios de las concentraciones de material particulado fino, grueso, MP10 y hollín. Estas mediciones y análisis se realizaron en cooperación con la Universidad de Sao Paulo.

Fig 2.7 Promedios de MP10, MP fino, grueso, hollín y elementos para las estaciones Parque O'Higgins, Las Condes, La Florida y Pudahuel



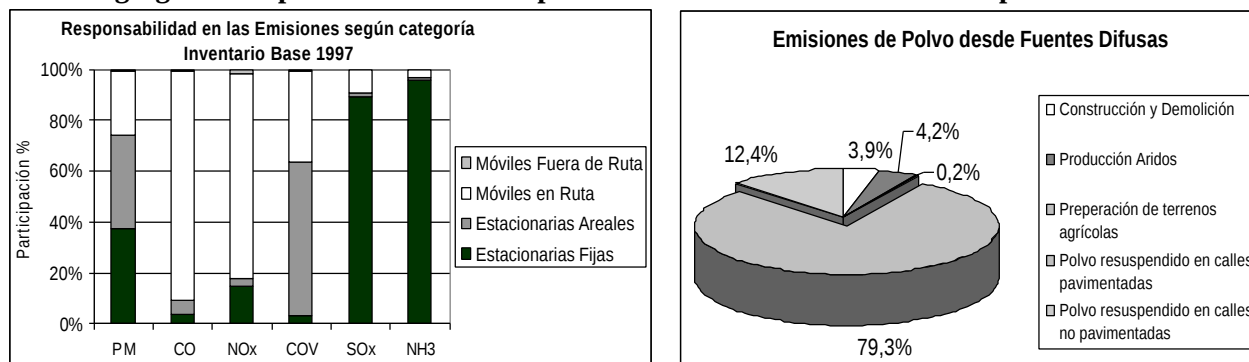
2.3. Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana

El inventario de emisiones que se presenta fue desarrollado haciendo uso de la mejor información disponible para cada tipo de fuente. Las fuentes estacionarias son tratadas en dos grupos: puntuales y de área, correspondiendo, respectivamente, uno al sector industrial y el otro a una gran diversidad de fuentes, algunas de ellas no consideradas en otros inventarios. Por su parte, las fuentes móviles se dividen en ruta, la flota vehicular, y fuera de ruta, o maquinaria pesada, aeronaves, etc., no estimadas con anterioridad.

Esta versión del inventario pone énfasis en mejorar la estimación de emisiones de NO_x, SO_x y COV y en generar un primer inventario de amoníaco (NH₃), para explicar mejor la formación del MP10 secundario. Junto a ello, debido al menor impacto que tienen las emisiones de polvo natural en las concentraciones en el aire de MP10, se analizan por separado para no distorsionar la evaluación de responsabilidades de las distintas fuentes.

La figura 2.8 tiene el inventario agregado en pocas categorías para facilitar la comprensión. Como se observa las fuentes estacionarias representan el 75% de las emisiones directas de MP10, siendo la mitad de ellas provenientes de fuentes industriales. Por su parte, las fuentes móviles aparecen como responsables de las emisiones de CO (90%) y dentro de éstas, los vehículos gasolineros concentran el 96% de las emisiones. También las fuentes móviles son responsables de la mayor parte de las emisiones (82%) de NO_x (precursor de MP10 y ozono), aunque en este caso son los vehículos diesel los de mayor contribución en la categoría (60%).

Figura 2.8: Inventario proporcional 1997 de PM10, CO, NO_x, COVs, SO_x y NH₃ en categorías de fuentes agregadas. Se presenta en forma separada el inventario de emisiones de polvo natural.



Fuente: Actualización del inventario de emisiones de la R.M. CENMA, diciembre de 1999.

Las emisiones mayoritarias de los otros precursores de ozono, los COVs, provienen de fuentes estacionarias (64% del total), aunque pueden ser mayores dada la subestimación causada por falta de información del consumo de solventes y pinturas en el sector industrial. Las fuentes areales concentran las emisiones de fuentes estacionarias, destacando las emisiones residenciales de uso de pinturas y solventes. Además, las fugas de gas licuado constituyen un componente importante de las emisiones de COVs, principalmente en el sector residencial. Esto otorga una importancia relevante al desarrollo de políticas de control para esos tipos de fuentes.

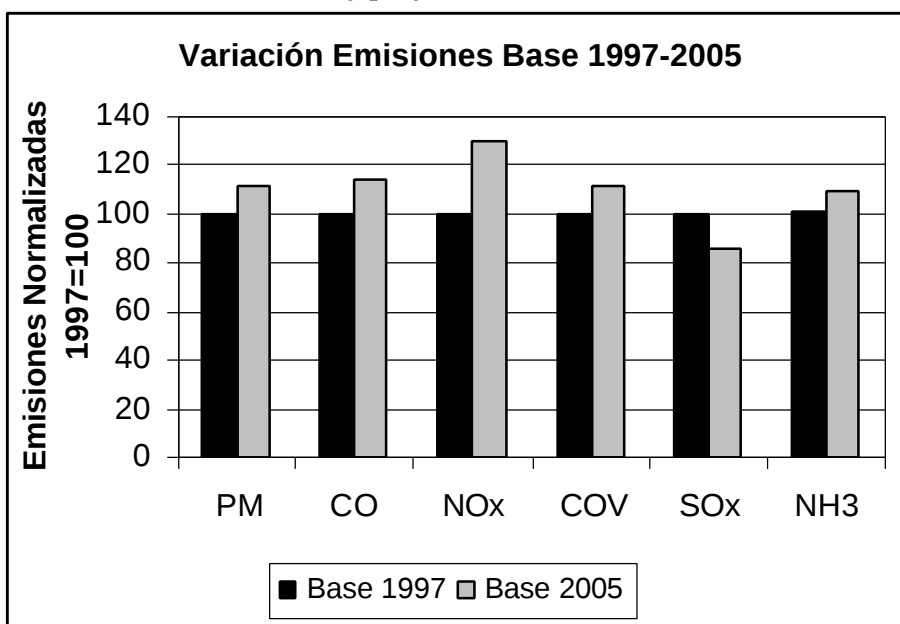
Las emisiones de COVs desde fuentes móviles están concentradas en los vehículos gasolineros. Por su parte, el 91% de las emisiones de SO_x son producidas por fuentes industriales de combustión, por el uso de combustibles con un alto contenido de azufre. A 1999, ello había

cambiado notoriamente con la transformación a gas natural de la mayoría de estas fuentes, lo que también ha acarreado una importante reducción de las emisiones de PM10.

Es claro que la mayor parte de las emisiones de polvo provienen del tráfico por calles pavimentadas (79%). No obstante lo anterior, existe una gran cantidad de factores que influyen en la cantidad de polvo en las calles que es resuspendido; calles sin pavimentar, por ejemplo, son una fuente importante (12.4%) y otras actividades como construcción, demolición y producción de áridos.

La figura 2.9 muestra las variaciones estimadas en los niveles de emisión para la situación base 1997-2005, es decir, si no se implementaran las medidas contempladas en el PPDA. Se observa un aumento de todas las emisiones, excepto de los óxidos de azufre, que disminuirían en un 14%. El material particulado, CO y COVs crecen entre el 10% y 15% en el período 1997-2005. Los óxidos de nitrógeno por su parte presentan un aumento preocupante del orden del 30%.

Figura 2.9. Inventario de emisiones 1997 y proyectado a 2005, sin medidas del PPDA aplicadas.



Fuente: Actualización del inventario de emisiones de la R.M. CENMA, diciembre de 1999.

Además, el inventario 2005 proyectado no muestra grandes diferencias en la participación de los diferentes sectores. Las mayores variaciones las podemos encontrar en categorías como fuentes móviles en ruta, donde aumenta la participación de los vehículos catalíticos en las emisiones, básicamente por el reemplazo de vehículos convencionales.

Algunos lineamientos para la descontaminación atmosférica de la R.M.

Producto de las políticas de control implementadas, la evolución de la calidad del aire en la ciudad de Santiago muestra una importante mejoría en la última década para la totalidad de los contaminantes normados en Chile, con la excepción de ozono. De ellos, el monóxido de carbono

muestra la principal disminución, con una reducción desde 60 días sobre norma en 1995 a 22 días durante 1998.

Una situación parecida ocurre con el material particulado respirable (MP10). En aquellas estaciones en que es factible hacer comparaciones de largo plazo², los días sobre norma han disminuido de 57 a 35 entre 1995 y 1999. Por su parte, los días sobre el nivel 300 (ICAP) que define situaciones de pre-emergencia ambiental, han disminuido de 9 a 0 en las mismas estaciones e igual periodo. Ello constituye un gran avance, pues es el MP10 el contaminante que alcanza en Santiago los niveles más agresivos para la salud de la población.

Sin bien, las mejoras en la calidad de los combustibles y la transformación industrial a gas natural han significado disminuciones relevantes en las emisiones de dióxido de azufre, aún se observan aisladamente algunas concentraciones elevadas, probablemente asociadas a fuentes locales.

Además, los mejores conocimientos adquiridos en los últimos años respecto de la contaminación por MP10 que afecta a la Región Metropolitana, confirman la experiencia internacional respecto de la importante participación que tiene el material particulado secundario, especialmente en su fracción fina (sobre el 50%). La componente secundaria del MP10, al igual que lo que ocurre con ozono, no se emite directamente desde las fuentes, sino que es el resultado de reacciones químicas producidas en la atmósfera por otros contaminantes, denominados sus precursores.

Ello obliga a profundizar las medidas de reducción de emisiones de los precursores de MP10, donde se encuentran los óxidos de azufre junto a óxidos de nitrógeno, algunos compuestos orgánicos volátiles y amoníaco. Este último compuesto no ha sido materia de políticas de control en los planes de descontaminación previos. Sin perjuicio de ello, no se debe descuidar la disminución de las emisiones directas de MP10 provenientes de la combustión de combustibles fósiles, especialmente diesel, dado la elevada toxicidad de este tipo de partículas. Además, son esas mismas fuentes las que emiten los precursores de material particulado, por lo cual su control cobra una relevancia trascendental.

Por otro lado, la evaluación de la composición de las concentraciones atmosféricas del material particulado ha permitido demostrar que la participación del polvo natural en la contaminación por MP10 es mucho menos importante de lo que se creía o de lo que se podía extraer de un análisis simple del inventario de emisiones. Ello por no considerar el material particulado secundario, ni la menor permanencia media en la atmósfera del polvo fugitivo debido a las características de su emisión (a nivel de superficie y a temperatura ambiente).

El ozono es el contaminante más persistente en Santiago, aunque como ya se mencionó, no el más agresivo para la salud. En 1998, superó 166 días la norma, siendo mayores las concentraciones en el sector nororiente de la ciudad. Si bien las máximas concentraciones de ozono se muestran estables en los últimos años, también es cierto que las principales medidas de control de los precursores de ozono contempladas en el PPDA, aun no entran en su fase 100% operativa, por lo que su efectividad real aún no es posible de evaluar.

Sin perjuicio de ello, es necesario incorporar nuevas estrategias de control de ozono, pues de acuerdo a la experiencia internacional, son los contaminantes secundarios los más difíciles de

² Las estaciones Providencia, La Paz, Parque O'Higgins y Las Condes cuentan con información previa a 1997, fecha de ampliación de la red de monitoreo.

eliminar. En este sentido, el perfeccionamiento del inventario de emisiones ha permitido identificar la importancia que tienen en la emisión de precursores de ozono el consumo domiciliario, comercial e industrial de productos que contienen compuestos orgánicos volátiles y las fugas de gas licuado, principalmente en el sector residencial. Este hecho señala la necesidad de diversificar las políticas de control contenidas en el PPDA hacia este tipo de fuentes.

Probablemente, una de las líneas de acción más efectivas para la descontaminación del aire en la Región Metropolitana, sea el control de las emisiones de vehículos a gasolina, principalmente en aquellos no provistos de convertidor catalítico, pues estas fuentes intervienen en la formación de todos los contaminantes sobre norma, ya sea mediante su emisión directa o la de sus precursores.

Capítulo 3

Extracto del documento “Bases para la Reformulación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana”

Expositora: Loreto Madrid Flores

3.1. Marco conceptual

El Plan y la protección de la salud de la población

Descontaminar el aire de la Región Metropolitana implica significativos beneficios económicos y sociales principalmente asociables a tres ámbitos:

- Beneficios en salud, reflejados en disminución de la morbilidad y mortalidad y sus consecuentes efectos en el aumento de bienestar y de productividad asociados a menores tasas de ausentismo laboral.
- Beneficios en la agricultura, reflejados en mejores productos y su consecuente aumento de valor para efectos de su consumo interno o en el extranjero.
- Beneficios en materiales, reflejados en un menor deterioro de los mismos y el consecuente ahorro en los costos reparación y mantención que esto implica.

Si bien existen otros beneficios entre los que destaca el aumento de la visibilidad, para efectos del escenario de contaminación de la Región Metropolitana, el principal beneficio es directamente asociable a la salud debido a que en términos relativos este ámbito es con creces el de mayor sensibilidad ciudadana y el que presenta mayores efectos negativos a nivel económico.

Es por ello, que el principal objetivo del Plan de Descontaminación es la protección de la salud de toda la población y en particular de aquellos grupos que presentan mayor vulnerabilidad como son los niños, ancianos, embarazadas y enfermos crónicos como asmáticos y alérgicos.

La protección de la salud se torna efectiva única y exclusivamente si se reconoce la exposición a los contaminantes que respiramos a diario, y en particular, a aquellos que se encuentran en los lugares en que pasamos la mayor parte del tiempo.

Es por ello que debemos enfrentar el problema enfocándonos a mejorar la calidad del aire en todos los ambientes en que nos desenvolvemos a diario, esto es, tanto a nivel intra como extramuros. Esto, ya que pueden ocurrir exposiciones a altos niveles de contaminantes no sólo generados por industrias o vehículos sino también por estufas, calefones, cocinas o el hecho de fumar en ambientes cerrados.

De aquí se desprende la necesidad de complementar la utilización de indicadores de contaminación externa, como los contruidos actualmente a partir de la información recolectada en las estaciones de monitoreo de calidad del aire, con parámetros que reflejen la reducción de exposición personal, los cuales dan cuenta en forma más certera de la relación existente entre contaminación y efectos en salud.

La magnitud del beneficio esperado en salud dependerá de la magnitud de reducción de concentraciones de contaminantes que se alcancen, producto de las estrategias implementadas, en

los ambientes en que nos desenvolvemos, y muy especialmente de aquellos contaminantes que tienen asociada una mayor toxicidad.

En dicho contexto, la contaminación puede, o bien causar un efecto agudo, como la muerte, en una situación de exposición a niveles muy altos ya sea a nivel intra³ como extramuros⁴, o bien, constituir un factor agudizante de una patología ya presentada, lo que habitualmente se corrobora en centros de atención primaria de urgencia. En tal contexto incluso puede llegarse a hablar de una muerte prematura.

Sin embargo, al considerar una exposición permanente a contaminantes particularmente tóxicos, son los efectos crónicos, que se manifiestan en el mediano y largo plazo, los que pueden presentar una gravedad mucho mayor, yendo desde enfermedades respiratorias de carácter crónico hasta la aparición de efectos carcinogénicos o mutagénicos que pueden conducir a la muerte.

La toxicidad de los diversos contaminantes constituye entonces un factor de gran preocupación, más aún cuando se considera el sinergismo en que varios contaminantes potencian su agresividad, tal como sucede con la concentración de sulfatos presentes en el Material Particulado Respirable observado en la Región Metropolitana.

Cabe señalar que la toxicidad asociada al Material Particulado respirable está condicionada tanto por su tamaño como por su composición química. En el caso de la Región Metropolitana y tal como sucede en otras urbes, el problema de la toxicidad asociada al tamaño se refleja en el llamado material particulado fino, correspondiente a aquellas partículas de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones, en donde se concentran las sustancias más agresivas para la salud. Estas partículas pueden emitirse directamente o formarse en la atmósfera a partir de reacciones químicas de otros contaminantes tales como Óxidos de Azufre, Óxidos de Nitrógeno y Amonio, entre otros⁵. Lo mismo ocurre con los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y los Óxidos de Nitrógeno en la formación de Ozono.

Al considerar la toxicidad asociada a la composición química se tiene que, a pesar de que metales tóxicos como Plomo, Cadmio, Vanadio y Níquel, entre otros, muestran claras tendencias a la reducción y que estudios exploratorios muestran similar tendencia para compuestos orgánicos altamente agresivos, como es el caso del Benzo(a)pireno, de todas formas, el Material Particulado Respirable al que esta siendo expuesta la población de la Región Metropolitana aún sigue siendo altamente tóxico.

Por lo anterior, los esfuerzos del PPDA de la Región Metropolitana han de enfocarse en la reducción de exposición al material particulado respirable, con especial énfasis en la fracción fina de mayor toxicidad, y en la reducción de exposición al ozono, ya que existe una directa vinculación con los beneficios en salud esperados.

De entre una gran variedad de instrumentos de reducción de emisiones disponibles en la legislación nacional, los instrumentos fundamentales son tres: (i) las normas de emisión, (ii) las

³ Es el caso de las muertes por inhalación de monóxido de carbono por emanaciones de estufas o calefontes.

⁴ Tal como se observó en los episodios críticos de Londres en 1954.

⁵ Estos últimos contaminantes adquieren la denominación de precursores y generan el llamado material particulado secundario.

normas de calidad de combustibles (iii) las normas primarias de calidad de aire. Las dos primeras se presentan en capítulos separados en este documento.

Las normas primarias de calidad del aire deberán adaptarse a los nuevos antecedentes de que se dispone respecto del problema de contaminación en la Región Metropolitana y usar como referencia la experiencia internacional.

De igual forma, deberá efectuarse una complementación adecuada entre la gradualidad requerida para enfrentar la solución definitiva a este problema y la urgencia de proteger la salud de la población.

Finalmente, ha de establecerse una nueva forma de interacción entre las autoridades a cargo de la protección de la salud y los diversos especialistas en el ámbito del conocimiento de los orígenes y efectos de la contaminación, así como en el ámbito de diseño de medidas de abatimiento sin olvidar la necesaria participación de la comunidad. Tal forma de interacción ha de traducirse en una mejor orientación de los recursos disponibles, a partir de la información ambiental que se ha generado, para llevar a cabo el proceso de actualización del Plan de Descontaminación y la que ha de seguir generándose a partir de la oficialización del mismo.

3.2. Tareas y compromisos para la reducción de emisiones

Control de las Emisiones de Actividades Existentes

Emisiones Vehiculares

El parque vehicular en la Región Metropolitana ha experimentado un sostenido crecimiento durante los últimos años. Esto se ha traducido, entre otras cosas, en un aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos en toda la región.

Si analizamos el crecimiento del parque de vehículos particulares durante el periodo 1985 y 1996, tenemos que éste ha aumentado en un 64% (383.187 vehículos al año 1985 y 627.352 en 1996). Se estima que esta tendencia tendrá un incremento equivalente en el período 1997-2010. El parque de buses, en cambio, se ha mantenido en aproximadamente 9000 buses producto de la regulación del transporte público. Por otra parte, con el congelamiento del parque de taxis, el número de vehículos que circula por la ciudad se ha mantenido en 52.000 unidades.

Según antecedentes de la situación de la calidad de aire de la Región Metropolitana para los distintos contaminantes, se ha podido constatar que el polvo natural es menos importante de lo que se creía en la contaminación por MP10, y menos aún por MP2.5. Considerando que la fracción secundaria de MP2.5 representa del orden de la mitad de las concentraciones de MP2.5, es necesario controlar las emisiones de sus precursores: SOx, NOx, COVs y NH3, si se pretende continuar con la disminución de este contaminante.

Desde este punto de vista las fuentes de combustión son prioritarias de controlar y tienen doble responsabilidad puesto que contribuyen tanto a las emisiones directas de contaminantes como a las emisiones de contaminantes secundarios (Ozono y MP secundario). En este sentido el control de vehículos gasolineros es probablemente la línea de acción más importante, pues intervienen directa o indirectamente en los contaminantes que superan las normas de calidad del aire.

Si observamos el inventario base de emisiones del año 1997, la responsabilidad del parque automotriz en la contaminación atmosférica se estima en un 26 % de las emisiones totales de Material Particulado (PM10) (no incluye polvo resuspendido), en un 91 % de las emisiones totales de Monóxido de Carbono (CO), en un 36 % de las emisiones totales de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), en un 82 % de las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) y en un 9 % de las emisiones totales de Óxidos de Azufre (SOx).

Por otra parte, dentro del parque de vehículos livianos y medianos, el número de vehículos no catalíticos representa actualmente el 50 % de los vehículos. Según el inventario base del año 1997, dicha flota contribuye al 76 % de las emisiones de CO, el 65 % de las emisiones de HC y 22 % de las emisiones de NOx respecto de las emisiones totales de fuentes móviles. Estas cifras indican claramente la necesidad de desarrollar e implementar medidas adicionales para reducir la contribución de esos vehículos a la contaminación atmosférica.

Para prevenir que el aumento del parque de vehículos de la región signifique una mayor emisión de contaminantes, es necesario actualizar las normas de emisión para modelos de vehículos y motores que ingresan al parque vehicular.

Durante la década pasada se han realizado una serie de esfuerzos para reducir las emisiones del transporte, con importantes avances desde el punto de vista tecnológico. También se han producido mejoras en la operación del sistema, como la licitación de recorridos, pero es evidente que éstos no han sido suficientes para garantizar al menos el congelamiento de las emisiones del sector.

Las principales estrategias para combatir las emisiones del parque de vehículos son reducir las emisiones por vehículo y disminuir la cantidad de viajes motorizados. Respecto de la primera estrategia, reducir las emisiones por vehículo, se han propuesto medidas que apuntan fundamentalmente a mejorar las condiciones técnicas de los motores de vehículos y paralelamente, mejoras en los combustibles.

De estas medidas, la más relevante y que se encuentra plenamente vigente, es el establecimiento de normas de emisión, que fijan máximos de emisiones a todos los vehículos que circulan en la Región Metropolitana. Esta estrategia de control, que tiene como objetivo prevenir una mayor emisión de contaminantes producto del aumento del parque de vehículos de la región, se inició en el año 1992 con la incorporación de los convertidores catalíticos en los automóviles. Posteriormente en el año 1993 se establecieron normas de emisión para motores de buses nuevos y se inició el control de opacidad en vehículos diesel en la vía pública. Luego en el año 1996 se establecieron normas de emisión más exigentes para motores de buses nuevos. Asimismo, se establecieron en el año 1994 y 1998 estándares de emisión para motores de camiones nuevos equivalentes a las definidos para los buses. En el año 1997 se inició la homologación de emisiones de los vehículos nuevos y comenzaron a operar las nuevas Plantas de Revisión Técnica.

Se encuentran, asimismo, finalizadas una serie de otras normas específicas para controlar las emisiones de los vehículos motorizados, como normas para motores de buses y motocicletas. Se encuentran también en desarrollo el procedimiento para la exigencia del recambio de convertidores catalíticos y la medición de los óxidos de nitrógeno para vehículos catalíticos en Plantas de Revisión Técnica.

Respecto de las mejoras en la operación, una de las medidas importantes que se han realizado y que han permitido regular el transporte público es la licitación de recorridos iniciada en el año 1992. Luego en el año 1993 se inició el proyecto de paradas diferidas para el transporte público en varios sectores de la ciudad. En el año 1996 comenzó a operar el sistema de control automatizado de tránsito y en el año 1997 se puso en funcionamiento la línea 5 del metro. En este mismo año a través del Plan de Transporte se mejoraron intersecciones y otras infraestructuras. Posteriormente en el año 1998 con el PPDA se eliminaron estacionamientos en el centro de Santiago y se congeló el parque de taxis.

Respecto de los combustibles, el PPDA ha establecido un calendario de mejoras en la calidad del diesel y de la gasolina. Tomando en cuenta que los combustibles utilizados actualmente en los diferentes medios de transporte contribuyen en un alto porcentaje en las emisiones de CO, NOx, COV y SO₂, se está trabajando para que en la Región Metropolitana éstos mejoren su calidad progresivamente. El objetivo es que en los próximos 3 años, lleguen a tener especificaciones ambientales equivalentes a las de los combustibles que se utilizan en California (el estado con mayores exigencias ambientales en EEUU) y a las que se implementarán en Europa a partir del 2000.

En el caso de la gasolina, se disminuirá el contenido de aromáticos, de azufre y de la presión de vapor de Reid, lo que permitirá reducir los hidrocarburos orgánicos volátiles (COV), precursores de la formación de ozono (O₃), y otras sustancias nocivas para el medio ambiente como benceno, tolueno y otros compuestos aromáticos.

Las propuestas de instrumentos que se presentan a continuación están orientadas a generar las acciones necesarias para la descontaminación del aire dentro del marco de las actividades relacionadas con el transporte. Para ello se han definido diferentes líneas de acción principalmente orientadas a cumplir con tres objetivos: 1) Prevenir el aumento de emisiones producto del crecimiento del parque vehicular, 2) Prevenir el aumento de las emisiones por aumento de los kilómetros recorridos y 3) Reducir las emisiones del parque de vehículos existentes.

Emisiones Industriales

Producto de las normas establecidas y de la conversión masiva a gas natural en reemplazo de petróleos pesados, se ha corroborado un sostenido descenso de las emisiones industriales desde 1990 a la fecha, llegándose a una situación de cumplimiento anticipado de la meta de reducción de emisiones directas de material particulado establecidas para el sector al año 2005.

Sin embargo, en un escenario de aumento de la actividad industrial, tal como se proyecta para el período 2000-2005, la industria continúa siendo el único sector para el cual no existe regulación a la emisión de gases precursores de material particulado secundario, de alta toxicidad. Este efecto precursor de los gases emitidos por fuentes estacionarias también se manifiesta en la formación de ozono.

Teniendo en cuenta que los esfuerzos en reducción de emisiones de material particulado no han sido homogéneos, existiendo fuentes que han cumplido anticipadamente su meta individual, en contraste con otras, de similares características, que no lo han hecho, es que el esfuerzo faltante ha de focalizarse en estas últimas fuentes.

En atención a lo anterior, y con el doble objetivo de reconocer los esfuerzos individuales anticipados y mantener el incentivo a la reducción permanente de emisiones, ha de modificarse el criterio de paralización de fuentes estacionarias en situaciones de episodios críticos de contaminación atmosférica, quedando excluidas de la exigencia de paralización aquellas fuentes que se encuentren en cumplimiento anticipado de las metas individuales de reducción de emisiones que se precisen en el Plan para el año 2005.

Por otro lado, considerando que se han detectado dificultades en el cumplimiento de las exigencias establecidas en el importante sector de la Pequeña y Mediana Empresa, asociadas, entre otros factores, a carencia de recursos, es que han de diseñarse instrumentos de apoyo financiero a tal sector, en complementación con instancias de capacitación e información.

Finalmente, en el contexto de prevención del aumento de emisiones en la Región Metropolitana, se han agudizado las exigencias de compensación de emisiones para nuevas fuentes, lo cual ha de complementarse con políticas de incentivo a la descentralización.

En resumen, los objetivos perseguidos son “Prevenir el aumento de emisiones industriales en la Región Metropolitana” y “Reducir las emisiones de fuentes existentes”. Para su cumplimiento, se llevarán a cabo las siguientes líneas de acción:

- Incorporación de exigencias de control de emisiones gaseosas en la regulación.
- Modificación del criterio de paralización de fuentes estacionarias en situaciones de episodios críticos de contaminación atmosférica.
- Incorporación de instrumentos de apoyo a la PYME para el cumplimiento de la regulación.
- Agudización de las exigencias de compensación de emisiones para nuevas fuentes, en complementación con exigencias tecnológicas e incentivos a la descentralización.

Emisiones de Polvo Natural

Actividades industriales construcción y otras.

Durante el año 1999 se realizaron diferentes estudios orientados al control de las emisiones de polvo natural, los cuales demostraron que cuando el polvo fino se incorpora a las calles de mayor tránsito resulta en una rápida resuspensión a la atmósfera, por lo tanto, es importante prevenir el aporte de polvo a las calles. Los mayores efectos ocurren en las calles de tierra que acceden a calles pavimentadas, salidas de vehículos desde sitios eriazos, construcciones, plantas de áridos y otros lugares donde la superficie del suelo ha sido perturbada por acción mecánica. Esto incluye lugares de estacionamiento de vehículos donde no está sellada la superficie del suelo y las bermas de tierra, bandejes centrales de tierra, etc.

El catastro de faenas productoras de áridos que operan en la Región Metropolitana, indica que existen 50 plantas, distribuidas principalmente en las comunas de Puente Alto (22%), Buin (14%), La Florida (14%), San Bernardo (10%) y Quilicura (10%). El monto de emisión de partículas respirables (MP10) de estas faenas ha sido estimado en 1.500 ton/año, que representan el 4,2% de las emisiones totales. La principal fuente la constituyen los caminos de acceso y rutas internas de servicio (no pavimentadas), los cuales representan alrededor de un 50% de la emisión total.

Las actividades de la construcción y demolición también contribuyen a la contaminación del aire de nuestra región (según el inventario base de emisiones de 1997, representan cerca del 4% de las emisiones totales de material particulado provenientes de estas fuentes). Las principales fuentes son el movimiento de tierra cuando se inician las obras, el transporte de arena, ripio o escombros, el pulido y cortado de materiales, los procesos de mezcla de cemento, el retiro de elementos residuales, etc. Por lo anterior, es necesario que estas actividades adopten medidas que controlen estas emisiones.

Una de las principales estrategias para combatir el polvo natural desde el origen es la pavimentación de calles y pasajes de la Región Metropolitana. Desde el año 1997 se han pavimentado 365 kilómetros de calles. A enero del año 2000 el déficit es de 328 kilómetros.

En noviembre del año 1999, se firmó un “Compromiso de Acuerdo” entre autoridades (SEREMITT, SEREMI MINVU, SESMA, CONAMA R.M, la Alcaldesa de Cerro Navia) y empresarios del transporte, cuyo objetivo fue la mejora de terrenos donde se encuentran emplazados los terminales de la locomoción colectiva urbana que operan en la comuna de Cerro Navia. Lo anterior, implica que a más tardar el 31 de marzo del presente año, se comenzará la pavimentación del terreno o eventualmente un estabilizado que garantice una solución definitiva a la emisión de material particulado producto del tránsito vehicular. Este acuerdo se pretende ampliar a las demás comunas de la región.

El control de polvo resuspendido se ha desarrollado a través del Programa de Aspirado y Lavado de Calles. Este se implementa desde marzo a septiembre y hasta el momento se han llevado a cabo 2 de los 5 años contemplados. Durante el año 1999, se ha realizado la limpieza de 700 Km., con una superficie involucrada de 500 km². Se colectaron 105 toneladas diarias de material.

Los principales objetivos que persigue el PPDA para el control de estas emisiones con los siguientes:

- Reducir las emisiones desde superficies sin ningún tipo de cubierta
- Reducir emisiones de polvo natural de actividades existentes (construcciones, demoliciones, producción de áridos)
- Controlar la resuspensión del polvo natural
- Prevenir el aumento de las emisiones de polvo natural asociado a nuevas actividades.

Áreas verdes

Las estructuras vegetales (áreas verdes y otras similares) siempre se han considerado como una forma natural de combatir la contaminación atmosférica de la ciudad Santiago, siendo complementarias al resto de las medidas emprendidas en este Plan. Deben considerarse los espacios verdes como estructuras facilitadoras de los movimientos de aire, que favorecen la ventilación local y la dispersión de contaminantes, para lo cual deben considerarse diseños adecuados que maximicen esta propiedad.

Según experiencias en 50 ciudades de Estados Unidos, se ha podido determinar la capacidad de retención y absorción de contaminantes atmosféricos por parte de árboles y arbustos en áreas verdes urbanas. Se estima que un área verde tipo, de una superficie de 270 ha. retiene aproximadamente. 10 ton/año PM10; 1,87 ton/año NOx, 1,25 ton/año SOx y 0,1 ton/año CO.

Además el arbolado de calles realiza una reducción de un 60% de polvo que pasa a través de sus hojas y reduce el ozono. Teniendo una directa relación el tamaño del árbol y su volumen foliar con la capacidad de retención (D. Nowak de UFORE-USDA, K.Coder de U. de Georgia).

Podemos distinguir, para efectos de este Plan, 3 tipos de espacios verdes: áreas verdes del tipo de plazas y parques; arbolado de calles.

El alto costo que implica construir y mantener áreas verdes, del tipo plazas y parques, tiene por resultado la falta de éstas, la no-concreción de zonas destinadas a ello en los instrumentos de planificación territorial, el abandono de áreas verdes y arbolado de calles debido al alto costo y escasos recursos que tienen algunos municipios, y la distribución desigual de áreas verdes por comunas.

La existencia y plantación de árboles de bajo diámetro y tamaño en el arbolado de calles, los cuales requieren no menos de 10 años para alcanzar un desarrollo adulto (Máximo volumen foliar), además de un deficiente manejo silvícola de éstos con podas abruptas, falta de mantención y daños producto de accidentes u otras acciones, los hacen poco eficientes para retener polvo. La existencia de suelos desnudos, producto de la acción antrópica, facilita la liberación de polvo, que puede ser evitada mediante una cubierta vegetal protectora, ya sea herbácea, arbustiva y/o arbórea. El aumento de la cobertura vegetal periurbana debe entenderse como medidas tendientes a incrementar la cobertura con árboles, arbustos y pasto (herbáceas) en los terrenos inmediatamente cercanos al Gran Santiago.

A través del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica debe propiciarse la formación de una red de espacios verdes de los tres tipos indicados, que faciliten la ventilación de la ciudad. La conectividad entre espacios verdes periféricos con áreas verdes urbanas y el arbolado de calles debe estimular la dispersión de contaminantes en la ciudad.

En este tema, los objetivos perseguidos por el PPDA son los siguientes:

- Mejorar la ventilación de la cuenca.
- Disminuir los terrenos sin cubierta vegetal destinados a áreas verdes
- Coordinar acciones para evitar el aumento de las emisiones de polvo natural producto de nuevas actividades

Emisiones Evaporativas

Se considerarán dos tipos de emisión, las evaporativas de COV y las de amoníaco. Las emisiones mayoritarias de los otros precursores de ozono, los COV, provienen de fuentes estacionarias (64% del total), aunque pueden ser mayores dada la subestimación causada por falta de información del consumo de solventes y pinturas en el sector industrial. Adicionalmente, las emisiones provenientes desde fuentes difusas aún no se han podido cuantificar completamente debido a la ausencia de antecedentes técnicos que permitan diseñar estrategias de control para la actividad o fuente emisora.

Las emisiones evaporativas representan el 27% de emisiones de COV totales. Se relacionan principalmente con la producción, almacenamiento y distribución de combustible, emisiones provenientes de las pinturas (talleres de pintado de vehículo, edificaciones) y solventes. La aplicación de pinturas forma una fracción significativa de todas las emisiones evaporativas,

debido a la gran cantidad de solventes que contienen y que durante su aplicación se evaporan. Se incluyen aquí las emisiones asociadas a actividades comerciales, como los lavasecos y a actividades asociadas a la industria química, tales como emisiones provenientes de la producción de determinados compuestos orgánicos.

Las emisiones de amoníaco provienen principalmente de emisiones industriales, de rellenos sanitarios o basurales, de emisiones asociadas a la crianza de animales y a las asociadas a alcantarillados y tratamientos de aguas servidas.

En marzo de este año, los tanques de almacenamiento de los cinco terminales de distribución de combustibles, estarán equipados con Sistemas de Recuperación de Vapor (SRV) (fase IA⁶). Por otra parte, las estaciones de expendio de combustible correspondiente al 50 % del total acumulado de las ventas durante el año 1997 están convertidas a la fase IB⁷.

Respecto de las nuevas estaciones de expendio de combustible instaladas con posterioridad al 6 de junio de 1998 (publicación del PPDA) están cumpliendo con la fase IB y fase II⁸.

Como se puede apreciar, la solución a los problemas en esta área se centra en establecer medidas de prevención y mitigación para el control de estas emisiones.

Los objetivos a cumplir en esta área son los siguientes:

- Disminuir emisiones evaporativas
- Disminuir emisiones en actividades comerciales

Control de las Emisiones Intramuros

La preocupación por el problema de contaminación intramuros se originó en los países desarrollados, los cuales se han abocado, al menos en los últimos quince años, a investigar y normar lo que ocurre dentro del hogar y en los lugares de trabajo. Lo anterior, debido a que el problema de calidad del aire exterior no era mayor y se encontraba bien definido y en vías de solución.

Distinta es la situación de la Región Metropolitana, en donde aún existe el problema en la calidad del aire y recién se está tratando el tema de la contaminación intradomiciliaria. Existe superación de los niveles de concentración recomendados por la OMS para la protección de la salud. La contaminación generada al interior de los hogares constituye entonces un agravante, dada la deficiente calidad de los combustibles utilizados y de la baja calidad en la construcción de viviendas, en amplios sectores de la población, principalmente de menores ingresos.

⁶ **Fase IA de recuperación de vapores:** Corresponde a aquella tecnología asociada a evitar emisiones evaporativas en las actividades de carga de combustibles desde el almacenamiento principal a los camiones de distribución.

⁷ **Fase IB de recuperación de vapores:** Corresponde a aquella tecnología asociada a evitar emisiones evaporativas de las actividades de descarga de combustibles desde camiones a los estanques de estaciones de servicio.

⁸ **Fase II de recuperación de vapores:** Corresponde a aquella tecnología asociada a evitar emisiones evaporativas en las actividades de carga de combustible en los automóviles.

La ausencia de información a usuarios respecto de la correcta utilización de equipos domésticos, que además carecen de certificación, en conjunto con una educación deficiente respecto del comportamiento individual orientado a reducir la exposición a contaminantes, agrava aún más el problema.

En tal sentido, la solución a los problemas anteriormente expuestos se centra en cuatro ejes fundamentales, a saber:

- a) Reducción de exposición a emisiones de origen domiciliario en viviendas existentes
- b) Prevención en viviendas nuevas
- c) Educación y prevención
- d) Certificación y fiscalización

Programa de control de eventos de alta contaminación

El Plan Operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación incluido en el PPDA de 1997 ha sido implementado en gran medida durante los últimos tres años, destacando el establecimiento formal de roles y atribuciones de los distintos organismos públicos responsables de la gestión de episodios, y la adecuada y creciente coordinación de ellos en el tiempo.

Otros de los logros fundamentales fueron la renovación y ampliación del monitoreo de contaminantes atmosféricos y la incorporación del pronóstico de calidad de aire como herramienta de declaración de episodios. Ambas acciones han resultado en una mayor protección de la salud de la población, al identificar áreas con mayores problemas de polución, y al adelantarse a la ocurrencia de eventos con el fin de aminorar su impacto en la calidad del aire y en la exposición de las personas.

Esas medidas se han traducido en un aumento de los días en los cuales se decretan situaciones preemergencia ambiental, dando la errada impresión de un empeoramiento de la calidad de aire. Por ello, es imprescindible mejorar la comunicación pública, puesto que los notables avances que se han obtenido en la gestión de la calidad de aire, y especialmente, en la gestión de los episodios, no guardan relación con la percepción general que se tiene de ellos.

Por otro lado, persisten aspectos deficitarios para una gestión de episodios críticos más efectiva. En primer lugar, es necesario optimizar las medidas de control, aumentando su efectividad en reducción de emisiones, la capacidad de su seguimiento y revisando su equidad. En este contexto se sitúan una modificación a los criterios con que se define la paralización de las fuentes fijas, una revisión a los calendarios de restricción vehicular; incorporando a vehículos con sello verde, y el establecimiento de medidas de desincentivo al uso del automóvil particular durante episodios.

En segundo lugar, es fundamental ahondar en mejorar la efectividad de la fiscalización y de las sanciones a infractores, incorporando a los municipios a estas tareas, rediseñando las medidas que faciliten la labor fiscalizadora, etc.. Además, y si bien a la fecha no se han registrado concentraciones que lo ameriten, es necesario definir planes operacionales para enfrentar episodios por ozono y monóxido de carbono, los cuales sólo podrán implementarse una vez que las normas de calidad de aire de dichos contaminantes sean revisadas, tarea que trasciende al PPDA.

Finalmente, la revisión de la norma primaria de MP10, realizada durante 1999, propuso al consejo directivo de CONAMA una metodología para la incorporación de criterios biomédicos en la definición de situaciones de episodios. La decisión del Consejo Directivo está pendiente y, probablemente considerará los nuevos antecedentes aportados durante el proceso de discusión de la norma, entre otros, por la Organización Panamericana de la Salud, como el equipo de expertos que auditó el PPDA.

El gran objetivo que se desea cumplir en el marco de la reformulación del PPDA es “Reducir el impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población durante situaciones de episodio”. Para su cumplimiento se han planteado las siguientes líneas de acción:

- Mejorar la efectividad y la equidad de las medidas de reducción de emisiones aplicadas en episodios.
- Optimizar la capacidad de fiscalización del cumplimiento de las medidas de control en situaciones de episodio.
- Optimizar la coordinación interinstitucional en el manejo de episodios y la comunicación pública de los episodios.

Otros Programas

Otros aspectos que considera el PPDA en su reformulación son el Programa de Educación Ambiental y Participación Ciudadana, y el Control de las Emisiones de Nuevas Actividades, no detallados aquí.

3.3. Sistema de Gestión para la implementación del Plan

La reformulación del PPDA considera un Sistema de Gestión para su implementación, cuyo diseño estratégico para el logro de compromisos, comprende “Exigencias a otros planes, políticas e instrumentos de Gestión complementarios”, así como el “Perfeccionamiento de la Gestión Pública de la Descontaminación Atmosférica en la Región”. Referente a lo primero, son específicamente abordadas las Políticas Sectoriales Regionales de Transporte, Ordenamiento Territorial, Energía, Educación y de Fomento a la descentralización y al desarrollo productivo, entre otros. En el tema del perfeccionamiento, dentro de la propuesta se consideran los mecanismos de financiamiento del PPDA.