

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).

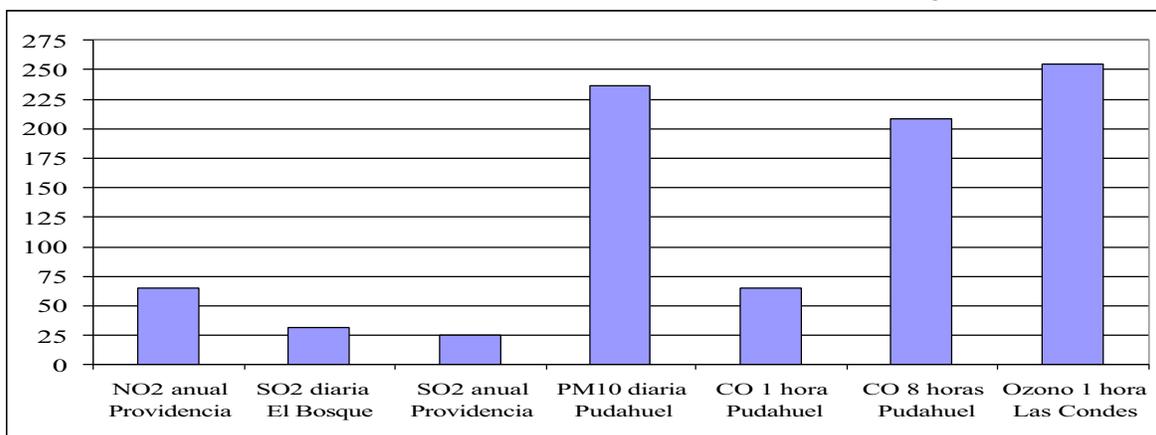
Los análisis mostrados a continuación se basan en la información de calidad de aire de 1995 y de 1998, selección que permite la comparación con los antecedentes que se usaron para declarar a la Región Metropolitana como Zona Saturada (1995), y que eran los más recientes completos y validados (1998).

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.

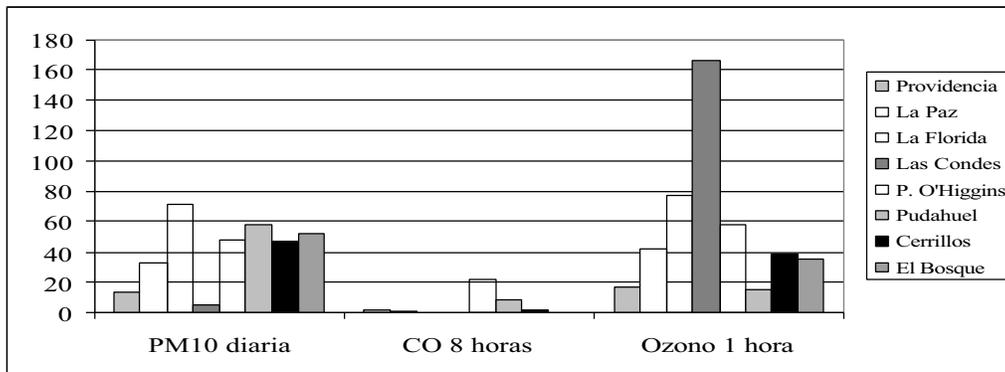
Figura 2.1: Porcentaje de la norma de calidad de aire alcanzado por los máximos valores registrados en 1998 en la Red MACAM2. Se señala la estación en la cual se registró dicho valor.



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.

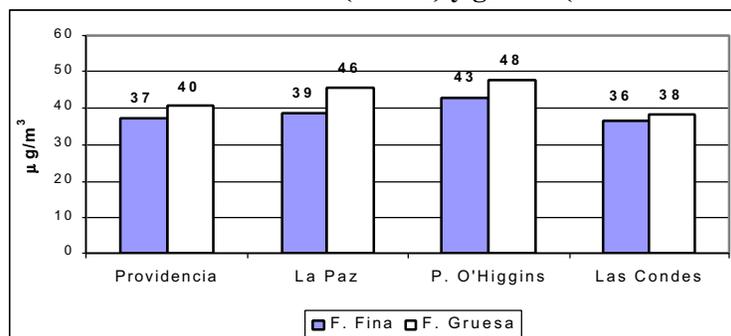


Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA.

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.

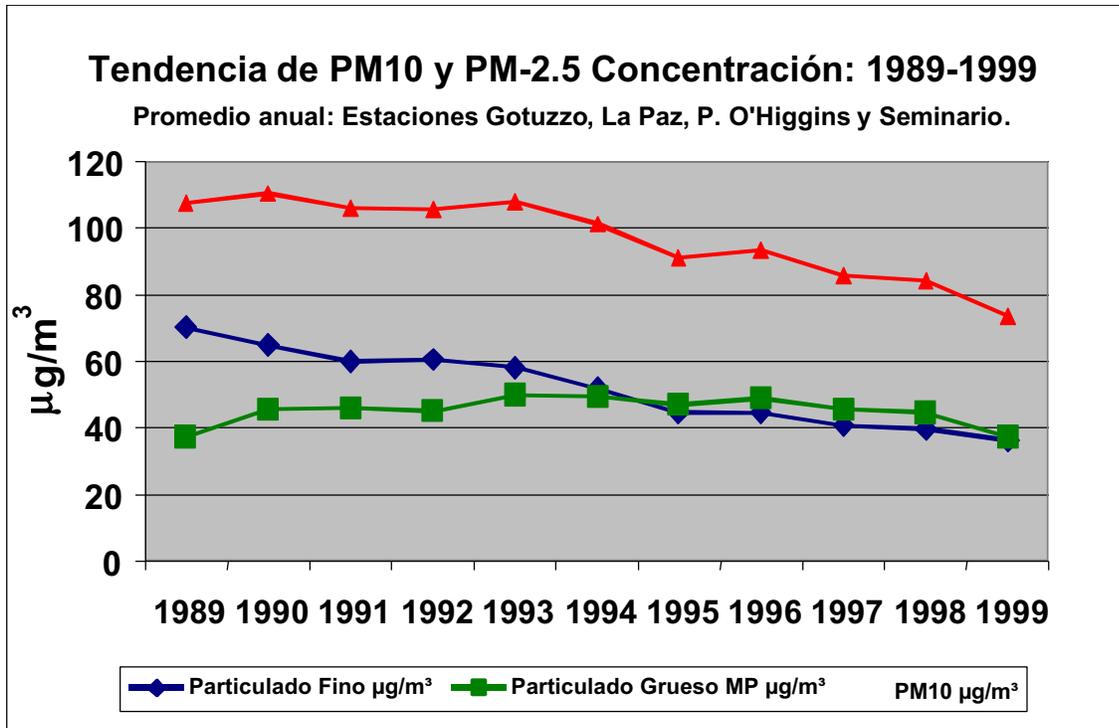
En la tabla 2.1, se observa un creciente número de días sobre norma de ozono en todas las estaciones, aunque los valores máximos no muestran similar comportamiento en la estación más crítica. A partir de 1995, la tendencia promedio de las concentraciones de ozono parece ser al alza, estimándose una pendiente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

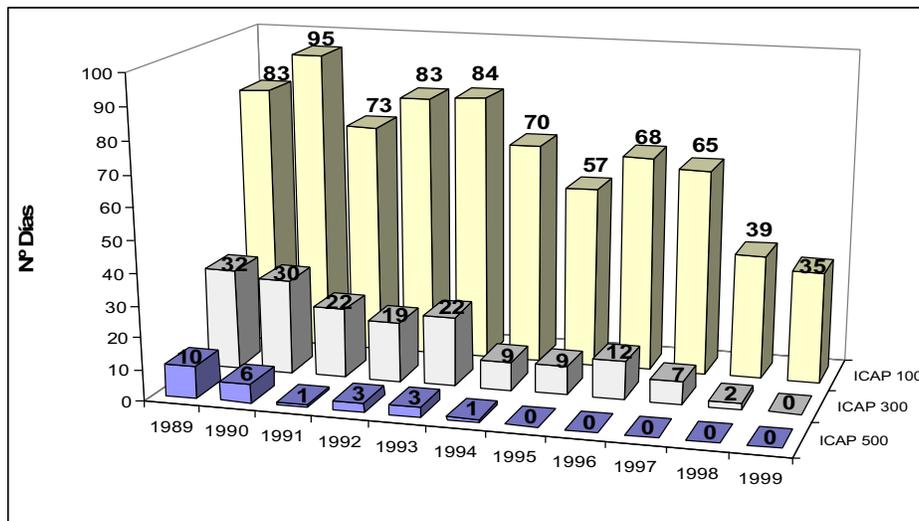
Figura 2.4. Tendencia de promedios anuales de MP10 y sus fracciones fina y gruesa



Elaboración propia a partir de información oficial de SESMA

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.



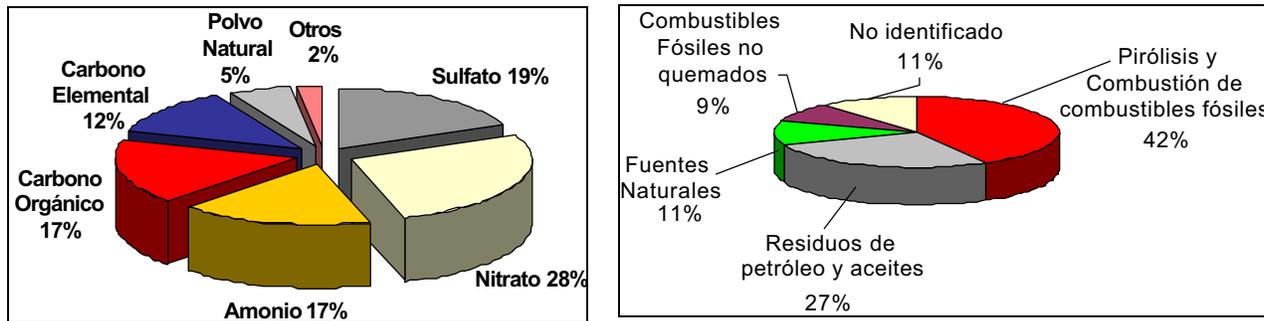
Fuente: elaboración propia a partir de información oficial de SESMA, obtenidos de monitor del tipo Dicotómico.

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.



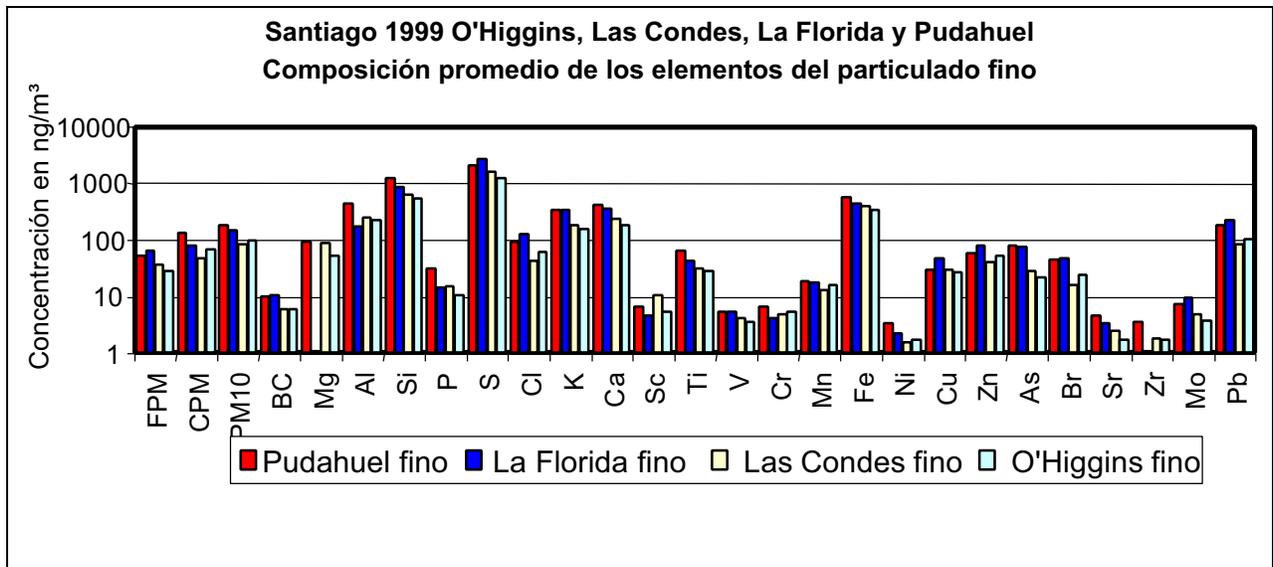
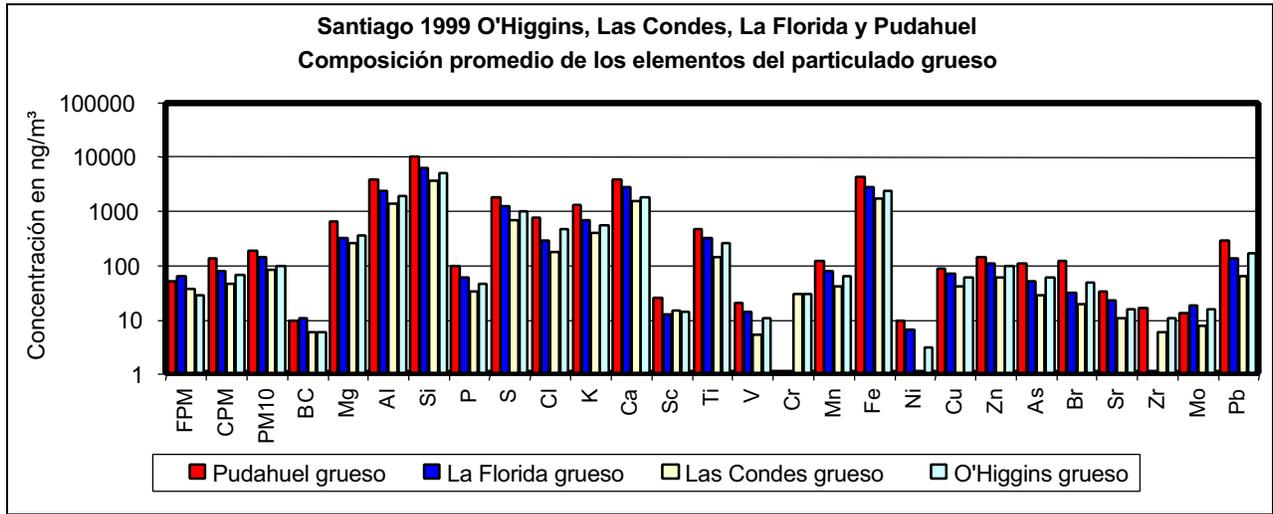
Fuente: elaboración propia.

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



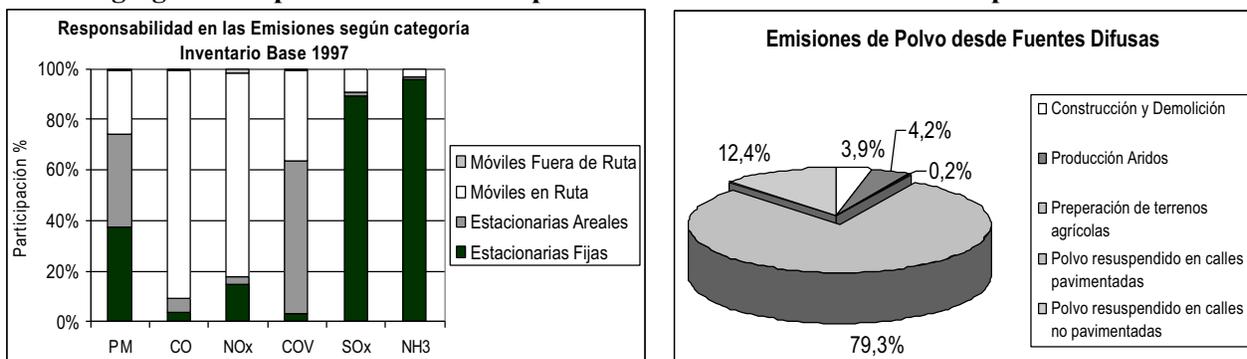
2.3. Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana

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.

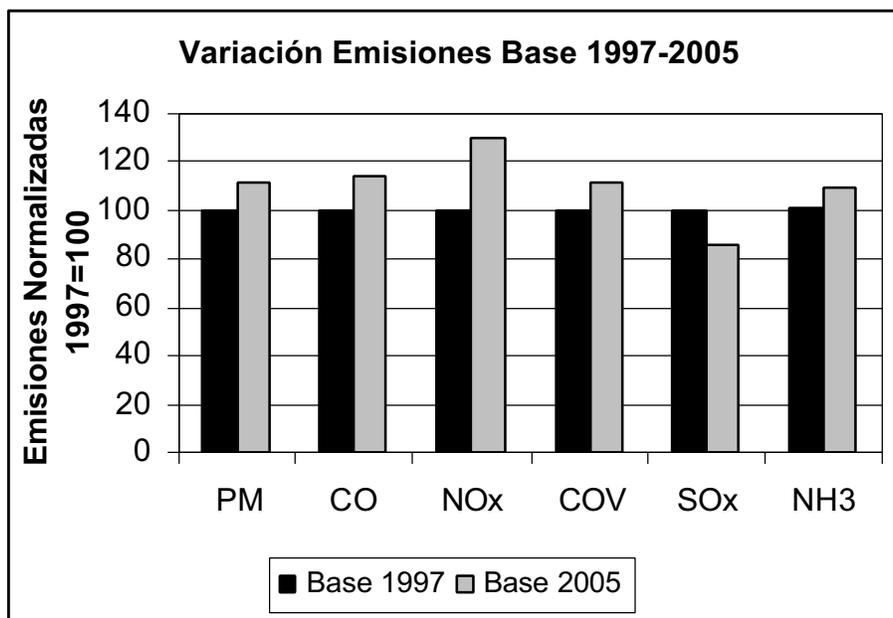
Las emisiones de COVs desde fuentes móviles están concentradas en los vehículos gasolineros. Por su parte, el 91% de las emisiones de SO_x son producidas por fuentes industriales de combustión, por el uso de combustibles con un alto contenido de azufre. A 1999, ello había

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.