

UCH-FC
G2 - Ambiental
G. 633
C 01



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Carrera de Química Ambiental



Comportamiento Espacial y Temporal de los Contaminantes Atmosféricos Medidos por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Santiago

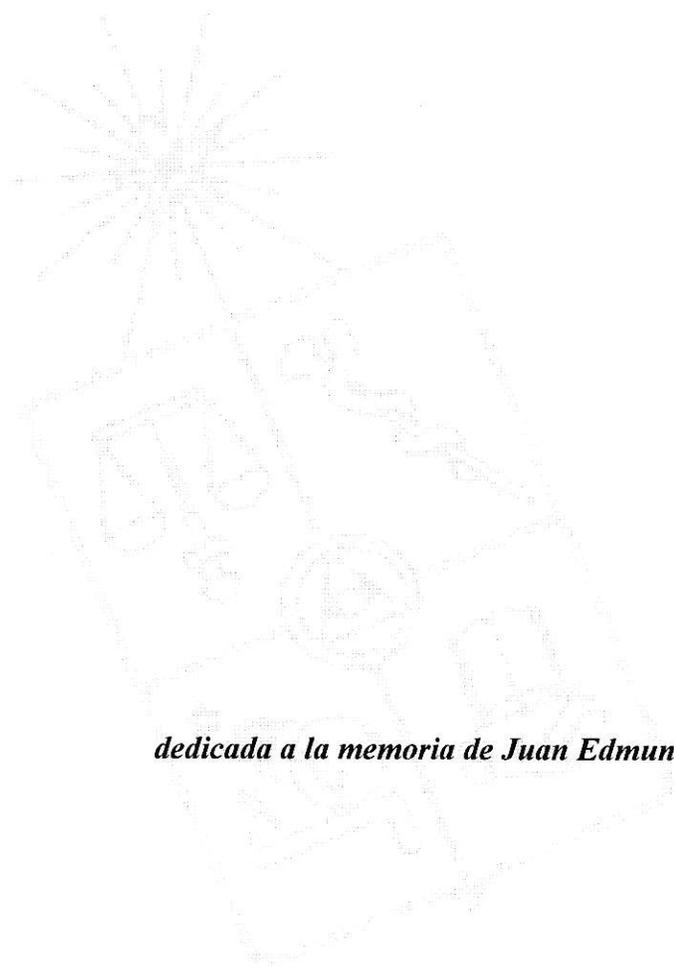
Memoria para optar al Título Profesional de Químico Ambiental

Luis Alberto Gómez Parada

Comisión

Pablo Ulriksen Profesor Guía
Fernando Mendizabal Director de Comisión
Consuelo Gamboa Profesor de Comisión
Hugo Sandoval Profesor de Comisión

Mayo del 2001



dedicada a la memoria de Juan Edmundo Parada R.

Agradecimientos

Deseo agradecer a las instituciones Universidad de Chile, Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA), Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y con ello a todas las personas que la conforman, por su entrega conocimientos, tiempo y recursos invertidos para llevar a cabo mi formación y la memoria.

En forma especial a Pablo Ulriksen, Laura Gallardo, Carolina Campos, Carolina Leal y Verónica Parada por el tiempo dedicado a la corrección de este escrito.

A mis profesores por motivarme a seguir esta profesión.

Y a toda mi familia...

Comportamiento Espacial y Temporal de los Contaminantes Atmosféricos Medidos por la Red La Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Santiago.

Memoria para optar al título profesional de Químico Ambiental, Universidad de Chile.

Alumno: Luis Alberto Gómez Parada

Mayo del 2001

Resumen:

En la ciudad de Santiago, se emite gran cantidad de contaminantes a la atmósfera, situación que sumada a la baja ventilación, originan altas concentraciones de contaminantes que afectan a la salud de su población. Desde 1997 la ciudad cuenta con una nueva red de ocho estaciones monitoras de calidad de aire, que realiza mediciones automáticas continuas de CO, SO₂, NO, NO_x, O₃, PM10 y variables meteorológicas.

A partir de los datos entregados por la red, se realizó un diagnóstico del comportamiento y evolución de los contaminantes atmosféricos en Santiago, proponiéndose los siguientes objetivos:

Describir el comportamiento temporal y espacial de los gases (CO, NO, NO₂, O₃, SO₂ y NO_x) y material particulado (PM10), medidos por la actual red de Monitoreo Automática de Calidad del Aire de Santiago (RED MACAM2), para el período con información disponible (Mayo de 1997 a Agosto de 1999). Estudiar las relaciones entre contaminantes y variables meteorológicas, especialmente el viento, para el mismo período. Estudiar las relaciones entre diferentes contaminantes medidos por la red. Explicar las diferencias de concentración de PM10 observadas en las distintas estaciones de la red.

Para ello se desarrolló un programa computacional que despliega en forma gráfica la información de calidad del aire y meteorología de la cuenca de Santiago. El programa permite visualizar de diferentes formas las series de tiempo, elegir períodos de interés, animarlos espacial y temporalmente y generar gráficos que relacionen los diferentes tipos de variables. Junto a ello, se diseñó e implementó un algoritmo que estima la altura de capa de mezcla, de los datos obtenidos por un equipo perfilador de temperaturas verticales, factor importante de la ventilación de la cuenca. Esta herramienta de visualización permite explorar el comportamiento y las relaciones entre diferentes variables apoyando el análisis sistemático del problema de contaminación atmosférico.

Entre los resultados relevantes obtenidos podemos citar la descripción de la distribución espacial y temporal de cada uno de los contaminantes y factores meteorológicos medidos y estimados. Se encuentran y describen los episodios de SO₂ (situación no conocida y controvertida debido a la asociación con las emisiones de la fundición de Cobre de Caltones, ubicada fuera de la Región Metropolitana), se describe el comportamiento de algunos precursores del smog fotoquímico y se analizan días con altos índices de PM10 en la estación de calidad de aire de Pudahuel, entre otros.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes Generales	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Resultados	2
1.4	Contenido	2
2	DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA DE REDES DE MONITOREO	4
3	INFORMACIÓN DISPONIBLE	7
3.1	Resumen estadístico	8
4	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN LA MEMORIA, PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO Y CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN	12
4.1	Análisis del comportamiento temporal	12
4.2	Análisis de la distribución espacial	14
4.3	Perfiles verticales de temperaturas y cálculo de altura de capa de mezcla	15
4.4	Estudio de relaciones entre variables meteorológicas y contaminantes.	17
5	RELIEVE DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
6	VARIABLES METEOROLÓGICAS	22
6.1	Circulación atmosférica en la cuenca	23
6.2	Altura de la capa de mezcla	25
6.3	Condiciones sinópticas asociadas a episodios de contaminación.	29
7	COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES MEDIDOS EN SANTIAGO	31
7.1	MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	33
7.1.1	Antecedentes generales	33
7.1.2	Ciclo diario promedio de CO	34
7.1.3	Ciclo diario promedio distribuido espacialmente	38
7.1.4	Comparación interanual	41
7.2	DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	43

7.2.1 Antecedentes generales	43
7.2.2 Episodios de SO ₂	44
7.2.3 Ciclos diarios promedio	46
7.2.4 Distribución espacial	46
7.3 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO + NO₂ = NO_x)	49
7.3.1 Antecedentes generales	49
7.3.2 Ciclos diarios promedio	51
7.3.3 Distribución espacial	53
7.4 OZONO (O₃)	57
7.4.1 Antecedentes generales	57
7.4.2 Ciclos diarios promedio	58
7.4.3 Distribución espacial	58
7.4.4 Comparación interanual	60
7.5 MATERIAL PARTICULADO (PM10)	61
7.5.1 Antecedentes generales	61
7.5.2 Ciclos diarios promedio	64
7.5.3 Distribución espacial	65
7.5.4 Caso de la estación de Pudahuel	65
7.5.5 Comparación interanual	67
8 EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM10	70
8.1 Factores meteorológicos	70
8.2 Contaminantes monitoreados por la red	74
8.3 Relaciones entre variables durante días de episodios	75
9 CONCLUSIONES	78
10 GLOSARIO	81
11 BIBLIOGRAFÍA	83
12 ANEXO A	87
13 ANEXO B	102

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

Santiago, ciudad capital de Chile, posee la mayor densidad poblacional, industrial y de transporte del país. Debido a ésto, un gran porcentaje de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera se concentran en la cuenca, situación que, sumada a la baja ventilación, originan altas concentraciones de contaminantes en los meses de otoño e invierno, las que dan lugar a los denominados episodios de contaminación.

En numerosas ocasiones se superan las concentraciones establecidas por las normas primarias de calidad del aire (Ministerio de Salud, 1978). Por este motivo, según la ley 19.300 (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994), la Región Metropolitana de Santiago ha sido declarada Zona Latente para dióxido de nitrógeno (NO₂) y Zona Saturada para material particulado respirable (Inglés PM10), partículas totales en suspensión (PTS), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃).

Para proveer de información oportuna de la calidad de aire a las autoridades ambientales competentes (CONAMA RM, SESMA), desde el año 1987 se implementó una red de monitores de calidad de aire, que realiza mediciones automáticas continuas de CO, dióxido de azufre (SO₂), óxido nítrico (NO), O₃ y PM10. A partir de 1997, se incorporaron a la red nuevos equipos y estaciones, los que fueron financiados mediante un convenio con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). La nueva red de monitoreo, consta de ocho estaciones operadas por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA). Además de la red de calidad de aire, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) ha desarrollado una red de estaciones meteorológicas formadas por veintidós estaciones, ubicadas en la Región Metropolitana y operadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).

Varios son los motivos que justifican el análisis de los datos entregados por la red de monitores de calidad del aire y la red meteorológica de Santiago, entre otros: la información recogida y almacenada que potencialmente permitiría entender el comportamiento y evolución de los contaminantes atmosféricos en Santiago; observar el efecto que tendrían el cambio de las emisiones (SESMA, 1999) debido, a la aplicación de medidas de control, reemplazo de combustibles y cambios tecnológicos en los últimos años (CONAMA, 1998); podría ayudar a explicar las diferencias de concentración entre las distintas estaciones de la red.

Sin embargo, una limitante provocada por la numerosa y variada información, es la poca variedad y versatilidad de herramientas, tales como programas computacionales, que permitan manipular, asociar y desplegar los datos recolectados. La mayoría de los estudios realizados, entregan una visión parcial de la situación (Olaeta, 1997, 1998 y 1999; Ulriksen et al, 1997, 1998 y 2000). Por otra parte, la mayoría de los investigadores en Santiago, han dado mayor énfasis al estudio del PM10 y no han analizado adecuadamente el comportamiento de otros contaminantes monitoreados (Ulriksen, 2000).

1.2 Objetivos

En consideración a lo expuesto, los objetivos de la memoria son:

- Crear un programa computacional que permita visualizar el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes y las variables atmosféricas.

-
- Describir el comportamiento temporal y espacial de los gases (CO, NO, NO₂, O₃ y NO_x) y material particulado (PM10), medidos por la actual red de Monitoreo Automática de Calidad del Aire de Santiago (RED MACAM2) entre Mayo de 1997 y Agosto de 1999.
 - Estudiar las relaciones entre contaminantes y variables meteorológicas, especialmente el viento, para el mismo período.
 - Estudiar las relaciones entre diferentes contaminantes medidos por la red.
 - Explicar las diferencias de concentración de PM10 en las distintas estaciones de la red.

Paralelamente, considerando la importancia que tiene para la salud de la población, se analizará en forma integrada un episodio de contaminación atmosférica de gran relevancia.

1.3 Resultados

Como producto de la memoria se creó un programa computacional que permite analizar la información recolectada por la actual red de Calidad del Aire y la red Meteorológica de la cuenca de Santiago. Junto a ello, se diseñó y desarrolló un modelo de prueba, capaz de estimar sistemáticamente la altura de la inversión térmica, a partir de perfiles verticales de temperatura medidos por el equipo LAP-RASS. De esta manera se intentó abordar con una visión sistémica, el problema de contaminación atmosférica, permitiendo dar respuesta a los objetivos propuestos al inicio de la memoria.

De igual manera se realizaron importantes innovaciones metodológicas, tales como: el desarrollo de nuevas formas de graficar la información ambiental; cálculo de inversión térmica para Santiago a partir del perfil térmico medido. Por último, toda la información es agrupada y manejada en un sólo programa computacional, permitiendo integrar y desplegar la información recolectada por las redes de monitoreo ambiental.

Entre los aspectos relevantes obtenidos a partir del análisis de la información podemos citar, la estimación del factor de ventilación para Santiago, el hallazgo y descripción de los episodios de SO₂ (situación no descrita y controvertida debido a la asociación con las emisiones de la fundición de Cobre de Caletones, ubicada fuera de la Región Metropolitana), la justificación de la distribución espacial de los contaminantes responsables del smog fotoquímico medidos en la red, el análisis en forma integrada de los episodios de contaminación atmosférica, la justificación de los altos índices de contaminación en Pudahuel, el comportamiento y distribución espacial y temporal de los contaminantes medidos en Santiago, entre otros.

1.4 Contenido

La memoria está dividida en once Capítulos más dos Anexos, junto a ella se incluye un disco compacto que contiene una versión escrita de la memoria en formato "Portable Document Format" (PDF), Lenguaje de Marcas Hipertextuales (HTML) y animaciones interactivas (FLASH). Paralelamente se generó un sitio en Internet que contiene la memoria (<http://www.atmos.htmlplannet.com/>).

Capítulo N° 1: "INTRODUCCION". Introduce al tema de contaminación atmosférica en Santiago, discute brevemente la información existente, presenta los objetivos de la memoria y entrega una visión general del trabajo realizado.

-
- Capítulo N° 2:** “DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA DE REDES DE MONITOREO”. Da una visión general e histórica de las redes de monitoreo ocupadas en Santiago y un análisis de los principales trabajos realizados en contaminación atmosférica para esta ciudad.
- Capítulo N° 3:** “INFORMACIÓN DISPONIBLE”. Describe la información analizada en el trabajo y entrega una descripción de las redes de monitoreo que la proveen.
- Capítulo N° 4:** “DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN LA MEMORIA, PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO Y CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN”. Muestra el programa computacional y los gráficos desarrollados en la memoria para el análisis de los contaminantes atmosféricos, obtenidos desde redes de monitoreo ambiental.
- Capítulo N° 5:** “RELIEVE DEL ÁREA DE ESTUDIO”. Presenta una descripción del relieve de la cuenca de Santiago.
- Capítulo N° 6:** “VARIABLES METEOROLÓGICAS”. Entrega una visión general de las variables meteorológicas en Santiago, descripción de los principales fenómenos que afectan el transporte y concentración de los contaminantes y análisis del algoritmo empleado para el cálculo de altura de capa de mezcla.
- Capítulo N° 7:** “COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES MEDIDOS EN SANTIAGO”. En este capítulo se entrega una visión general del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera y un análisis temporal y espacial de los contaminantes medidos por la actual red de calidad del aire, entre los años 1997 y 1999.
- Capítulo N° 8:** “EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM10”. Análisis en forma integrada, de uno de los principales episodios de PM10, medidos por la red de calidad del aire de Santiago.
- Capítulo N° 9:** “CONCLUSIONES”. Presenta las principales conclusiones de este trabajo.
- Capítulo N° 10:** “GLOSARIO”. Define alguno de los términos ocupados en la memoria.
- Capítulo N° 11:** “BIBLIOGRAFIA”. Publicaciones, informes y libros utilizados para fundamentar y discutir la memoria.
- Anexo A:** Entrega información relativa a los monitores ocupados para el análisis de contaminantes y la red meteorológica de la Región Metropolitana.
- Anexo B:** Contiene información sobre la distribución espacial de las emisiones en Santiago, de algunos contaminantes primarios y perfiles de algunos contaminantes fotoquímicos.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes Generales	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Resultados	2
1.4	Contenido	2
2	DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA DE REDES DE MONITOREO	4
3	INFORMACIÓN DISPONIBLE	7
3.1	Resumen estadístico	8
4	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN LA MEMORIA, PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO Y CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN	12
4.1	Análisis del comportamiento temporal	12
4.2	Análisis de la distribución espacial	14
4.3	Perfiles verticales de temperaturas y cálculo de altura de capa de mezcla	15
4.4	Estudio de relaciones entre variables meteorológicas y contaminantes.	17
5	RELIEVE DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
6	VARIABLES METEOROLÓGICAS	22
6.1	Circulación atmosférica en la cuenca	23
6.2	Altura de la capa de mezcla	25
6.3	Condiciones sinópticas asociadas a episodios de contaminación.	29
7	COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES MEDIDOS EN SANTIAGO	31
7.1	MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	33
7.1.1	Antecedentes generales	33
7.1.2	Ciclo diario promedio de CO	34
7.1.3	Ciclo diario promedio distribuido espacialmente	38
7.1.4	Comparación interanual	41
7.2	DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	43

7.2.1 Antecedentes generales	43
7.2.2 Episodios de SO ₂	44
7.2.3 Ciclos diarios promedio	46
7.2.4 Distribución espacial	46
7.3 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO + NO ₂ = NO _x)	49
7.3.1 Antecedentes generales	49
7.3.2 Ciclos diarios promedio	51
7.3.3 Distribución espacial	53
7.4 OZONO (O ₃)	57
7.4.1 Antecedentes generales	57
7.4.2 Ciclos diarios promedio	58
7.4.3 Distribución espacial	58
7.4.4 Comparación interanual	60
7.5 MATERIAL PARTICULADO (PM10)	61
7.5.1 Antecedentes generales	61
7.5.2 Ciclos diarios promedio	64
7.5.3 Distribución espacial	65
7.5.4 Caso de la estación de Pudahuel	65
7.5.5 Comparación interanual	67
8 EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM10	70
8.1 Factores meteorológicos	70
8.2 Contaminantes monitoreados por la red	74
8.3 Relaciones entre variables durante días de episodios	75
9 CONCLUSIONES	78
10 GLOSARIO	81
11 BIBLIOGRAFÍA	83
12 ANEXO A	87
13 ANEXO B	102

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

Santiago, ciudad capital de Chile, posee la mayor densidad poblacional, industrial y de transporte del país. Debido a ésto, un gran porcentaje de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera se concentran en la cuenca, situación que, sumada a la baja ventilación, originan altas concentraciones de contaminantes en los meses de otoño e invierno, las que dan lugar a los denominados episodios de contaminación.

En numerosas ocasiones se superan las concentraciones establecidas por las normas primarias de calidad del aire (Ministerio de Salud, 1978). Por este motivo, según la ley 19.300 (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994), la Región Metropolitana de Santiago ha sido declarada Zona Latente para dióxido de nitrógeno (NO₂) y Zona Saturada para material particulado respirable (Inglés PM10), partículas totales en suspensión (PTS), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃).

Para proveer de información oportuna de la calidad de aire a las autoridades ambientales competentes (CONAMA RM, SESMA), desde el año 1987 se implementó una red de monitores de calidad de aire, que realiza mediciones automáticas continuas de CO, dióxido de azufre (SO₂), óxido nítrico (NO), O₃ y PM10. A partir de 1997, se incorporaron a la red nuevos equipos y estaciones, los que fueron financiados mediante un convenio con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). La nueva red de monitoreo, consta de ocho estaciones operadas por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA). Además de la red de calidad de aire, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) ha desarrollado una red de estaciones meteorológicas formadas por veintidós estaciones, ubicadas en la Región Metropolitana y operadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).

Varios son los motivos que justifican el análisis de los datos entregados por la red de monitores de calidad del aire y la red meteorológica de Santiago, entre otros: la información recogida y almacenada que potencialmente permitiría entender el comportamiento y evolución de los contaminantes atmosféricos en Santiago; observar el efecto que tendrían el cambio de las emisiones (SESMA, 1999) debido, a la aplicación de medidas de control, reemplazo de combustibles y cambios tecnológicos en los últimos años (CONAMA, 1998); podría ayudar a explicar las diferencias de concentración entre las distintas estaciones de la red.

Sin embargo, una limitante provocada por la numerosa y variada información, es la poca variedad y versatilidad de herramientas, tales como programas computacionales, que permitan manipular, asociar y desplegar los datos recolectados. La mayoría de los estudios realizados, entregan una visión parcial de la situación (Olaeta, 1997, 1998 y 1999; Ulriksen et al, 1997, 1998 y 2000). Por otra parte, la mayoría de los investigadores en Santiago, han dado mayor énfasis al estudio del PM10 y no han analizado adecuadamente el comportamiento de otros contaminantes monitoreados (Ulriksen, 2000).

1.2 Objetivos

En consideración a lo expuesto, los objetivos de la memoria son:

- Crear un programa computacional que permita visualizar el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes y las variables atmosféricas.

-
- Describir el comportamiento temporal y espacial de los gases (CO, NO, NO₂, O₃ y NO_x) y material particulado (PM10), medidos por la actual red de Monitoreo Automática de Calidad del Aire de Santiago (RED MACAM2) entre Mayo de 1997 y Agosto de 1999.
 - Estudiar las relaciones entre contaminantes y variables meteorológicas, especialmente el viento, para el mismo período.
 - Estudiar las relaciones entre diferentes contaminantes medidos por la red.
 - Explicar las diferencias de concentración de PM10 en las distintas estaciones de la red.

Paralelamente, considerando la importancia que tiene para la salud de la población, se analizará en forma integrada un episodio de contaminación atmosférica de gran relevancia.

1.3 Resultados

Como producto de la memoria se creó un programa computacional que permite analizar la información recolectada por la actual red de Calidad del Aire y la red Meteorológica de la cuenca de Santiago. Junto a ello, se diseñó y desarrolló un modelo de prueba, capaz de estimar sistemáticamente la altura de la inversión térmica, a partir de perfiles verticales de temperatura medidos por el equipo LAP-RASS. De esta manera se intentó abordar con una visión sistémica, el problema de contaminación atmosférica, permitiendo dar respuesta a los objetivos propuestos al inicio de la memoria.

De igual manera se realizaron importantes innovaciones metodológicas, tales como: el desarrollo de nuevas formas de graficar la información ambiental; cálculo de inversión térmica para Santiago a partir del perfil térmico medido. Por último, toda la información es agrupada y manejada en un sólo programa computacional, permitiendo integrar y desplegar la información recolectada por las redes de monitoreo ambiental.

Entre los aspectos relevantes obtenidos a partir del análisis de la información podemos citar, la estimación del factor de ventilación para Santiago, el hallazgo y descripción de los episodios de SO₂ (situación no descrita y controvertida debido a la asociación con las emisiones de la fundición de Cobre de Caletones, ubicada fuera de la Región Metropolitana), la justificación de la distribución espacial de los contaminantes responsables del smog fotoquímico medidos en la red, el análisis en forma integrada de los episodios de contaminación atmosférica, la justificación de los altos índices de contaminación en Pudahuel, el comportamiento y distribución espacial y temporal de los contaminantes medidos en Santiago, entre otros.

1.4 Contenido

La memoria está dividida en once Capítulos más dos Anexos, junto a ella se incluye un disco compacto que contiene una versión escrita de la memoria en formato "Portable Document Format" (PDF), Lenguaje de Marcas Hipertextuales (HTML) y animaciones interactivas (FLASH). Paralelamente se generó un sitio en Internet que contiene la memoria (<http://www.atmos.htmlplannet.com/>).

Capítulo N° 1: "INTRODUCCION". Introduce al tema de contaminación atmosférica en Santiago, discute brevemente la información existente, presenta los objetivos de la memoria y entrega una visión general del trabajo realizado.

-
- Capítulo N° 2:** “DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA DE REDES DE MONITOREO”. Da una visión general e histórica de las redes de monitoreo ocupadas en Santiago y un análisis de los principales trabajos realizados en contaminación atmosférica para esta ciudad.
- Capítulo N° 3:** “INFORMACIÓN DISPONIBLE”. Describe la información analizada en el trabajo y entrega una descripción de las redes de monitoreo que la proveen.
- Capítulo N° 4:** “DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN LA MEMORIA, PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO Y CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN”. Muestra el programa computacional y los gráficos desarrollados en la memoria para el análisis de los contaminantes atmosféricos, obtenidos desde redes de monitoreo ambiental.
- Capítulo N° 5:** “RELIEVE DEL ÁREA DE ESTUDIO”. Presenta una descripción del relieve de la cuenca de Santiago.
- Capítulo N° 6:** “VARIABLES METEOROLÓGICAS”. Entrega una visión general de las variables meteorológicas en Santiago, descripción de los principales fenómenos que afectan el transporte y concentración de los contaminantes y análisis del algoritmo empleado para el cálculo de altura de capa de mezcla.
- Capítulo N° 7:** “COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES MEDIDOS EN SANTIAGO”. En este capítulo se entrega una visión general del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera y un análisis temporal y espacial de los contaminantes medidos por la actual red de calidad del aire, entre los años 1997 y 1999.
- Capítulo N° 8:** “EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM10”. Análisis en forma integrada, de uno de los principales episodios de PM10, medidos por la red de calidad del aire de Santiago.
- Capítulo N° 9:** “CONCLUSIONES”. Presenta las principales conclusiones de este trabajo.
- Capítulo N° 10:** “GLOSARIO”. Define alguno de los términos ocupados en la memoria.
- Capítulo N° 11:** “BIBLIOGRAFIA”. Publicaciones, informes y libros utilizados para fundamentar y discutir la memoria.
- Anexo A:** Entrega información relativa a los monitores ocupados para el análisis de contaminantes y la red meteorológica de la Región Metropolitana.
- Anexo B:** Contiene información sobre la distribución espacial de las emisiones en Santiago, de algunos contaminantes primarios y perfiles de algunos contaminantes fotoquímicos.

2 DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA DE REDES DE MONITOREO

Las primeras mediciones sistemáticas, orientadas a estimar los niveles de contaminación atmosférica de Santiago, se llevaron a cabo en 1964 (Andrade et al 1973, Coopman et al 1974, Silo 1975-1981). Se utilizaron metodologías sencillas y de bajo costo, que permitían medir índice de acidez (método del agua oxigenada), índice de suciedad, polvo sedimentable e índice de corrosión. Las estaciones fueron ubicadas en el centro de la ciudad, de manera de conocer la exposición de las personas.

Debido a la necesidad de conocer mejor la contaminación en Santiago, en 1976 se instaló una nueva "red de Vigilancia de Calidad del Aire", como parte de un estudio entre 1976 y 1978, "Programa de Contaminación Atmosférica en la Región Metropolitana", realizado por INTEC, Servicio Nacional de Salud (SNS) y Municipalidades del gran Santiago y financiado por la Corporación de Fomento (CORFO, 1978). Los principales objetivos del estudio fueron: determinar los tipos y niveles de contaminantes atmosféricos en Santiago; identificar las fuentes emisoras de contaminación; estudiar la zonificación industrial, basándose en las características de difusión de los contaminantes y generar información, que permita tomar las medidas de control. La red, estaba constituida por una estación monitorea continua en el centro y estaciones de muestreo semiautomáticas ubicadas en anillos concéntricos al centro de la ciudad. La estación del centro medía en forma continua CO, SO₂ y HCT, paralelamente y en forma discontinua las otras medían SO₂, CO, NO, NO₂, hidrocarburos (HC), O₃, PTS (partículas totales en suspensión) y polvo sedimentable.

Con los datos obtenidos por esta red, se pudo concluir que existía un grave problema de contaminación por CO en el centro de la ciudad, PTS en toda el área metropolitana y durante todo el año. También, se concluyó que los niveles de SO₂ y NO₂ estaban por debajo del límite máximo permisible (Sanhueza y Lissi 1981, Riesco 1980, Escudero et al 1981).

A partir del "Estudio de impuestos a la emisión de contaminantes de aire y agua en la Región Metropolitana" (Iasa, 1981), se vio la necesidad de incorporar a la ciudad con una nueva red y se propuso su distribución. En el año 1987, se puso en marcha la red MACAM-RM, obteniendo con ello mediciones automáticas y continuas en Santiago. El objetivo principal de esta red fue medir el grado de contaminación en el área central de la ciudad y sus entornos. Para ello se equiparon cinco estaciones (cuatro en el área central y una en Las Condes) con monitores que permitían registrar las concentraciones de CO, SO₂, NO/NO₂/NO_x y O₃, promedios diarios de PM10 y PM2,5 (muestreadores dicótomos) y las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento.

Con la información que generó la red MACAM-RM, se declaró en 1997 a la Región Metropolitana Zona Saturada de cuatro contaminantes (PTS, PM10, CO y O₃) y Zona Latente de NO₂, de acuerdo a las normas primarias de calidad del aire.

En el año 1996, se crea el CENMA, para dar el apoyo técnico a la CONAMA en materia ambiental, mejorar la actual red de monitoreo de contaminación atmosférica e implementar una red meteorológica destinada a la calidad del aire. Resultado de este proyecto, fue la creación en 1997 de la actual red MACAM2 y la red meteorológica de calidad del aire, ambas destinadas a proveer a las autoridades ambientales competentes de la Región Metropolitana información que permita proteger la salud de sus habitantes. La red MACAM2, es un resultado de una ampliación y reubicación de las estaciones de la red MACAM-RM. Esta red está formada por ocho estaciones, distribuidas de forma que permitan describir, de la mejor forma posible, la calidad del aire de toda la ciudad.

La red meteorológica se formó en varias etapas. En el año 1994 fue instalada una estación donada por la Universidad de Chile dentro del marco de un proyecto de investigación; en el año 1995 se incorporaron siete estaciones donadas por la Cooperación Sueca; la Cooperación Holandesa en el año 1996 donó seis estaciones más; por último en el año 1997 la Cooperación Japonesa donó diez estaciones de las cuales dos se instalaron en la costa, fuera de la Región Metropolitana.

Con la información existente hasta el año 1993, la Universidad de Chile, la Comisión de Descontaminación Metropolitana y el Banco Santander editaron el libro "Contaminación Atmosférica de Santiago" (Sandoval, Prendez, Ulriksen et al. 1993), que describe la ventilación de la cuenca, las emisiones y comportamiento temporal de las concentraciones de contaminantes en la ciudad. En él, también se analizan los efectos sobre la salud humana y las posibles soluciones al problema de la contaminación atmosférica de Santiago.

Desde 1994 hasta 1996, la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, suscribió un convenio de cooperación técnica con el Gobierno Sueco para desarrollar el "Proyecto de Mejoramiento de la Información Requerida para el Control de la Contaminación Atmosférica de la R.M." (CONAMA, 1996), para mejorar la calidad de las mediciones, la información meteorológica y desarrollar un sistema de información para apoyar la gestión ambiental

En el Proyecto de Cooperación Chile-Suecia, se implementaron metodologías de monitoreo de contaminantes no medidos previamente en Santiago. Las mediciones se realizaron a través de un monitor tipo DOAS. Junto con ello, se llevaron a cabo campañas con tubos pasivos, los que permitieron observar concentraciones promedio de SO₂ y NO₂ a través de la ciudad. También se utilizaron técnicas específicas para la determinación de especies gaseosas orgánicas, que permitieron conocer en forma preliminar concentraciones de hidrocarburos aromáticos, aldehídos y cetonas.

Junto con esta información, se han realizado diversos estudios sobre el material particulado en Santiago, por investigadores e instituciones como Sandoval et al 1985, 1990, Universidad de Chile, 1985, De la Vega et al. 1986 y 1987, Rojas et al. 1990, Campos 1991, Préndez 1991, Hortvath y Trier 1993, Artaxo 1997, 1998 y 1999, Ulriksen et al, 1999 y 2000, los que están enfocados a caracterizarlo y aplicar, en algunos casos, modelos de tipo receptor para identificar sus fuentes.

Debido al fuerte interés que crea el estudio del material particulado, salvo el estudio con el Gobierno Sueco, en el año 1996 y el Libro Contaminación Atmosférica de Santiago, en el año 1993, no existen trabajos que aborden globalmente el comportamiento de los principales contaminantes medidos en Santiago. Esta situación genera una visión parcial de la contaminación de la ciudad.

Actualmente, la información de calidad de aire para Santiago se obtiene de las ocho estaciones de la red MACAM2 y de algunas mediciones especiales. La información meteorológica proviene de la red de estaciones de superficie, ubicadas en la red MACAM2 y el equipo de perfiles verticales de velocidad y temperatura. El almacenamiento y despliegue de la información recolectada se realiza con el sistema computacional AIRVIRO. Lamentablemente este programa es poco versátil al momento de manipular y graficar la información, es de alto costo y sólo está disponible en algunas estaciones de trabajo ubicadas en CONAMA-RM, SESMA y CENMA.

Los datos medidos por el perfilador de vientos y temperatura, LAP-RASS (ver anexo A), ubicado en una de las estaciones de la red meteorológica, sólo son utilizados para obtener el

tope y base de la inversión térmica diaria de subsidencia. Esta situación, sin lugar a dudas es una subutilización de la información, ya que éste entrega valores horarios del perfil, los que han sido ocupados regularmente sólo para el pronóstico de episodios.

Por último, no existe metodología aplicada en Santiago, que permita estimar en forma sistemática la altura de capa de mezcla y por lo tanto no hay trabajos en que se incorpore esta variable en su análisis.

3 INFORMACIÓN DISPONIBLE

En Santiago, el SESMA opera desde el año 1997, la red MACAM 2 (Olaeta, 1997). Esta red está formada por 8 estaciones monitoras de calidad del aire (*Tabla N° 1* y *Figura N° 1*), las que miden en forma continua concentraciones de CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂, O₃, y PM₁₀, HCNM, CH₄ y variables meteorológicas (temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento). Los equipos empleados y su principio de funcionamiento se describen en el anexo A.

Tabla N° 1 Estaciones de monitoreo de la red MACAM 2.

ESTACIONES	DIRECCIÓN	COMUNA	Variables monitoreadas
B	Providencia/Seminario	Providencia	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
F	Avda. La Paz 850	Independencia	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
L	Alonso Ercilla 1270	La Florida	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
M	Las Condes 11755	Las Condes	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
N	Interior Parque O'Higgins	Santiago Centro	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
O	El Lazo 8667	Pudahuel	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
Q	Riquelme # 155	El Bosque	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10
P	Av. Cerrillos	Cerrillos	CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , HCNM, CH ₄ , O ₃ , y PM10

Fuente: SESMA 1997

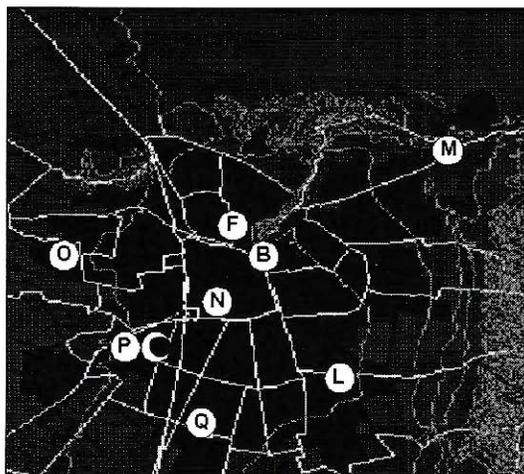


Figura N° 1 Mapa de Santiago que muestra la ubicación de las estaciones de la red MACAM.

Fuente: SESMA 1997.

Paralelamente, el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), opera una red meteorológica (*Tabla N°22*), orientada a obtener datos para determinar la ventilación de la cuenca (CENMA, 1999). Los datos recolectados son utilizados para generar el Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (CENMA, 1999; Rutllant – Garreud 1995). La red está formada por diecinueve estaciones, que miden en forma continua temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento. Las estaciones están ubicadas en la cuenca de Santiago, valles del entorno, cerros de la Cordillera de la Costa y zona costera. También opera un equipo de perfiles verticales de viento y temperatura (LAP-RASS), ubicado en La Platina,

capaz de medir indirectamente temperatura virtual de la atmósfera entre los 100 m y 1.500 m y dirección y velocidad de vientos desde los 100 m a 4.000 m de altura.

Los datos de calidad de aire de las estaciones de la red MACAM 2, se transfieren cada cinco minutos por línea telefónica a un computador central ubicado en el SESMA, donde se almacenan y se calculan la información. Los datos son reenviados a CENMA y a la Comisión Nacional de Medio Ambiente Región Metropolitana (CONAMA-RM), donde son almacenados en bases de datos del sistema de información AIRVIRO (Tornevik, 1993). Esta información es utilizada para el pronóstico de episodios de contaminación en Santiago.

La información de calidad de aire, es sometida a un proceso de validación de varias etapas. La operación regular de las estaciones, incluye la verificación automática de cero y estándar (span) para cada uno de los monitores de gases, calibraciones periódicas de los equipos y un programa de mantención preventiva y correctiva.

El sistema de administración de la base de datos (AIRVIRO), verifica automáticamente las características de cada variable (rango, cambios bruscos y otros) y agrega una marca a cada dato. Posteriormente, se realiza una validación adicional de la información en forma manual, donde se revisan las series de datos y se descarta la información de períodos de mal funcionamiento de los equipos, períodos de calibración y otros que no corresponden a mediciones ambientales.

En la red meteorológica operada por el CENMA, se aplica un programa de mantención, y calibración orientado a prevenir pérdida de información. El control de calidad de la información incluye varias etapas, orientadas a verificar la calidad de los datos.

El entorno de algunas estaciones de calidad de aire podría causar problemas de representatividad del área que se desea muestrear. La estación de Providencia está ubicada entre dos vías de gran flujo vehicular (Av. Providencia y Av. Costanera) y, además, tiene árboles muy cercanos. La estación de la Florida está ubicada en un centro municipal, con piscinas y canchas, incrementando sus actividades en fin de semanas. Además, la calle adjunta, ubicada al Nororiente de la estación, estuvo sin pavimento durante varios años. Las estaciones de Cerrillos, Pudahuel y El Bosque, están ubicadas en recintos municipales con actividades periódicas durante el día (movimiento de vehículos). En algunos de estos sitios, parte importante del suelo del entorno a la estación estaría descubierto.

3.1 Resumen estadístico

A continuación (*Tabla N° 2*), se presenta un resumen estadístico de los datos recolectados hora a hora por la red MACAM2 y en la estación meteorológica de La Platina (donde existe una estación de superficie y el equipo LAP-RASS, ver Anexo A). El período en el que se calcularon los datos presentados en la Tabla, fue desde Enero de 1997 hasta Septiembre de 1999, para una estandarización del cálculo. Sin embargo, las primeras mediciones comenzaron a ser capturadas en la base de datos del sistema AIRVIRO, el 21 de Marzo de 1997 en las estaciones de Las Condes, Parque O'Higgins, el 24 de Marzo de 1997 en La estaciones de la Paz y la Florida y el 4 de Mayo de 1997 en las estaciones de Cerrillos, El Bosque, Providencia y Pudahuel.

Tabla N° 2 Resumen de los datos ocupados en el estudio, entre enero de 1997 a Septiembre de 1999 (valores horarios)

Nombre de la variable	Promedio total	Desviación std	Numero de datos válidos	Datos no registrados	Total	Unidad de medida
Dir Viento Providencia	93,81	87,50	445	25835	26280	Grados
Dir Viento La Paz	174,56	100,45	21160	5120	26280	Grados
Dir Viento La Florida	198,86	86,66	21097	5183	26280	Grados
Dir Viento Las Condes	159,63	93,87	21432	4848	26280	Grados
Dir Viento P O'Higgins	214,95	83,22	21255	5025	26280	Grados
Dir Viento Pudahuel	202,42	73,72	21113	5167	26280	Grados
Dir Viento Cerrillos	196,02	70,23	21072	5208	26280	Grados
Dir Viento El Bosque	182,28	86,89	21236	5044	26280	Grados
Vel viento Providencia	3,46	3,16	445	25835	26280	m/s
Vel viento La Paz	1,25	0,92	21159	5121	26280	m/s
Vel viento La Florida	1,18	0,83	21097	5183	26280	m/s
Vel viento Las Condes	1,61	0,85	21432	4848	26280	m/s
Vel viento P O'Higgins	1,31	1,09	21255	5025	26280	m/s
Vel viento Pudahuel	1,81	1,38	21113	5167	26280	m/s
Vel viento Cerrillos	2,17	1,63	21072	5208	26280	m/s
Vel viento El Bosque	1,54	0,98	21234	5046	26280	m/s
T La Paz	15,70	6,36	22826	3454	26280	°C
T La Florida	14,86	6,94	22749	3531	26280	°C
T Las Condes	14,35	6,40	22993	3287	26280	°C
T P O'Higgins	15,39	6,33	22376	3904	26280	°C
T Pudahuel	15,01	6,48	22803	3477	26280	°C
T Cerrillos	15,20	6,17	22542	3738	26280	°C
T El Bosque	14,97	6,67	22853	3427	26280	°C
CO Providencia	1,55	1,78	23415	2865	26280	ppm
CO La Paz	1,25	1,61	23744	2536	26280	ppm
CO La Florida	1,18	1,59	22717	3563	26280	ppm
CO Las Condes	0,77	0,77	23459	2821	26280	ppm
CO P O'Higgins	1,44	2,48	23169	3111	26280	ppm
CO Pudahuel	1,04	2,06	22702	3578	26280	ppm
CO Cerrillos	1,04	1,84	22842	3438	26280	ppm
CO El Bosque	1,21	1,69	22746	3534	26280	ppm
PM10 Providencia	73,26	49,53	23922	2358	26280	ug/m ³
PM10 La Paz	85,52	60,08	23562	2718	26280	ug/m ³
PM10 La Florida	99,23	77,39	21860	4420	26280	ug/m ³
PM10 Las Condes	73,16	54,92	23231	3049	26280	ug/m ³
PM10 P O'Higgins	90,95	74,42	23380	2900	26280	ug/m ³
PM10 Pudahuel	97,59	89,36	23438	2842	26280	ug/m ³
PM10 Cerrillos	90,89	75,95	23786	2494	26280	ug/m ³
PM10 El Bosque	93,37	73,35	23706	2574	26280	ug/m ³
SO2 Providencia	6,98	8,04	23251	3029	26280	ppb
SO2 La Paz	6,05	7,46	20783	5497	26280	ppb
SO2 La Florida	5,18	8,37	20898	5382	26280	ppb
SO2 Las SO2ndes	3,67	4,79	22763	3517	26280	ppb
SO2 P O'Higgins	5,60	7,66	20343	5937	26280	ppb
SO2 Pudahuel	3,75	5,42	20713	5567	26280	ppb
SO2 Cerrillos	5,23	7,28	20854	5426	26280	ppb
SO2 El Bosque	5,41	10,41	20167	6113	26280	ppb
O3 Providencia	7,92	12,06	21102	5178	26280	ppb
O3 La Paz	11,16	17,37	23538	2742	26280	ppb
O3 La Florida	15,07	20,78	23182	3098	26280	ppb
O3 Las Condes	18,04	25,96	23876	2404	26280	ppb
O3 P O'Higgins	13,54	19,39	23515	2765	26280	ppb
O3 Pudahuel	13,78	16,55	22291	3989	26280	ppb
O3 Cerrillos	14,40	17,81	23475	2805	26280	ppb
O3 El Bosque	12,45	17,17	23919	2361	26280	ppb
NMHC Providencia	0,46	0,77	15347	10933	26280	ppb
NMHC La Paz	2,73	7,19	2026	24254	26280	ppb
NMHC La Florida	0,58	1,32	13513	12767	26280	ppb
NMHC Las Condes	0,41	0,73	12741	13539	26280	ppb

Nombre de la variable	Promedio total	Desviación std	Numero de datos válidos	Datos no registrados	Total	Unidad de medida
NMHC P O'Higgins	0,71	0,87	13753	12527	26280	ppb
NMHC Pudahuel	0,7	4,7	13928	12352	26280	ppb
NMHC Cerrillos	0,79	6,18	15395	10885	26280	ppb
NMHC El Bosque	0,97	15,15	9936	16344	26280	ppb
NO Providencia	120,06	278,00	9671	16609	26280	ppb
NO La Paz	95,56	233,79	11531	14749	26280	ppb
NO La Florida	56,08	78,46	10698	15582	26280	ppb
NO Las Condes	48,03	303,28	14581	11699	26280	ppb
NO P O'Higgins	113,68	332,20	10422	15858	26280	ppb
NO Pudahuel	119,03	369,37	13657	12623	26280	ppb
NO Cerrillos	104,38	467,67	12673	13607	26280	ppb
NO El Bosque	68,68	262,01	10749	15531	26280	ppb
NO ₂ Providencia	33,40	29,31	9402	16878	26280	ppb
NO ₂ La Paz	46,51	131,76	11807	14473	26280	ppb
NO ₂ La Florida	26,92	34,77	11237	15043	26280	ppb
NO ₂ Las Condes	35,79	145,74	15675	10605	26280	ppb
NO ₂ P O'Higgins	32,85	89,23	13782	12498	26280	ppb
NO ₂ Pudahuel	55,93	412,46	13651	12629	26280	ppb
NO ₂ Cerrillos	27,43	87,99	12521	13759	26280	ppb
NO ₂ El Bosque	22,06	25,45	11475	14805	26280	ppb
NOx Providencia	156,94	311,03	9703	16577	26280	ppb
NOx La Paz	121,81	203,49	11798	14482	26280	ppb
NOx La Florida	79,17	87,71	11179	15101	26280	ppb
NOx Las Condes	73,11	248,26	16147	10133	26280	ppb
NOx P O'Higgins	117,75	234,97	12685	13595	26280	ppb
NOx Pudahuel	143,34	486,54	16535	9745	26280	ppb
NOx Cerrillos	130,22	481,26	12826	13454	26280	ppb
NOx El Bosque	87,89	246,98	11856	14424	26280	ppb
CH ₄ Providencia	1,6	1,1	11355	14925	26280	ppm
CH ₄ La Paz	5,8	9,9	2111	24169	26280	ppm
CH ₄ La Florida	1,9	1,9	12322	13958	26280	ppm
CH ₄ Las Condes	1,7	0,8	6625	19655	26280	ppm
CH ₄ P O'Higgins	2,4	1,1	11533	14747	26280	ppm
CH ₄ Pudahuel	2,1	1,4	9266	17014	26280	ppm
CH ₄ Cerrillos	2,4	2,1	10745	15535	26280	ppm
CH ₄ El Bosque	2,7	0,6	8309	17971	26280	ppm
Radiación La Platina	188,24	278,26	23723	2557	26280	w/m ²
Dir viento La Platina	183,55	72,72	23723	2557	26280	grados
Vel viento La Platina	1,76	1,14	23723	2557	26280	m/s
T La Platina	14,30	45,89	23679	2601	26280	°C
T Lap-Rass (14 perfiles)	13,68	4,88	503845	284555	788400	°C
Total de datos			2.027.677	1.362.443	3.390.120	

La estación de Providencia no tiene registro de variables meteorológicas (excepto por algunos días al comienzo de las mediciones).

Debido a la gran cantidad de información disponible (3.390.120 datos), se realizó el procesamiento de los datos en una aplicación desarrollada en este trabajo, basada en el programa de cálculo numérico IGOR, al que nos referiremos posteriormente.

La red MACAM 2, empezó a operar durante el primer semestre de 1997. La red meteorológica se completó dentro de ese período. La información usada en este trabajo se extiende desde mediados de 1997 hasta fines de 1999.

Los datos de Hidrocarburos no metánicos (HCNM) y metano (CH₄) no fueron incorporados en el trabajo debido a la poca confiabilidad de los resultados, causado por un mal funcionamiento o mala operación de los monitores.

Todos los datos están guardados según la Hora Oficial de Chile de invierno (- 4 GMT), en valores promedios de una hora de 0:00 a 23:00 hrs. De esta manera, se evita tomar en cuenta el cambio de horario de invierno a verano (1 hora), que causa una variación exógena al estudio de los contaminantes. Sin embargo, con el tipo de gráficos empleados, es posible detectar un desplazamiento temporal en el ciclo diario del contaminante, provocado, en parte, por un cambio de las emisiones de Santiago, al efectuarse el cambio de hora entre invierno y verano.

La dirección del viento, está referida desde la dirección de origen. Por ejemplo, viento con dirección Sur, será aquél que proviene del Sur y se traslada hacia el Norte.

Al comenzar este trabajo no se disponían de datos públicos de PM_{2,5}. Por este motivo no fueron incorporados en el análisis.

4 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN LA MEMORIA, PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO Y CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Los datos fueron extraídos del sistema de base de datos AIRVIRO existente en el CENMA y transferidos a un programa especialmente desarrollado en este trabajo. Las aplicaciones del programa desarrollado permiten calcular, analizar y desplegar, contaminantes y variables meteorológicas medidas por la red MACAM2 y la red meteorológica de Santiago, en escala temporal y espacial, de una forma rápida y comprensible.

Como plataforma de programación, se utilizó el programa de cálculo numérico IGOR, el que tiene como principales ventajas:

- Un lenguaje de programación, que permite crear diferentes operaciones y barras de herramientas, de manera de generar un software que se adecue a las necesidades requeridas.
- Capacidad de almacenamiento de información.
- Despliegue gráfico, unidimensional y bidimensional.

Una de las principales características del programa desarrollado, es la capacidad para desplegar la información recolectada por las redes de monitoreo ambiental. De ésta manera, las visualizaciones, en estricto rigor, no corresponden a simulaciones computacionales, si no que a datos reales de mediciones puntuales. Gracias a ésto, las demandas computacionales son mínimas, permitiendo ejecutarse el programa en PC convencionales (Pentium 100 MHz, con 32 en RAM) y con resultados que pueden ser comparados con modelos atmosféricos complejos.

Las aplicaciones creadas en este trabajo y que conforman el programa de análisis atmosférico se describen a continuación.

4.1 Análisis del comportamiento temporal

Para observar la concentración de cualquier contaminante o seleccionar algún episodio, se construyó una ventana que permite desplegar las series de datos en forma temporal (*Figura N° 2*). En ella se pueden seleccionar períodos de días, semanas, meses o años, en forma rápida. Posee una escala de concentraciones ajustable.

Se incorporaron nuevas formas de representación gráfica (*Figura N° 3 y 4*) para el análisis de contaminantes, a través de imágenes que muestran la concentración de un contaminante mediante la intensidad del color de un píxel. Los pixeles se distribuyen en la imagen según la hora (eje x) y fecha (eje y). Junto a ello, se incorporaron isolíneas de concentración, lo que permite una mejor visualización de las tendencias de contaminantes. Las concentraciones de los contaminantes, pueden ser visualizadas a través de promedios horarios mensual (*Figura N° 3*) o promedios horario diario (*Figura N° 4*).



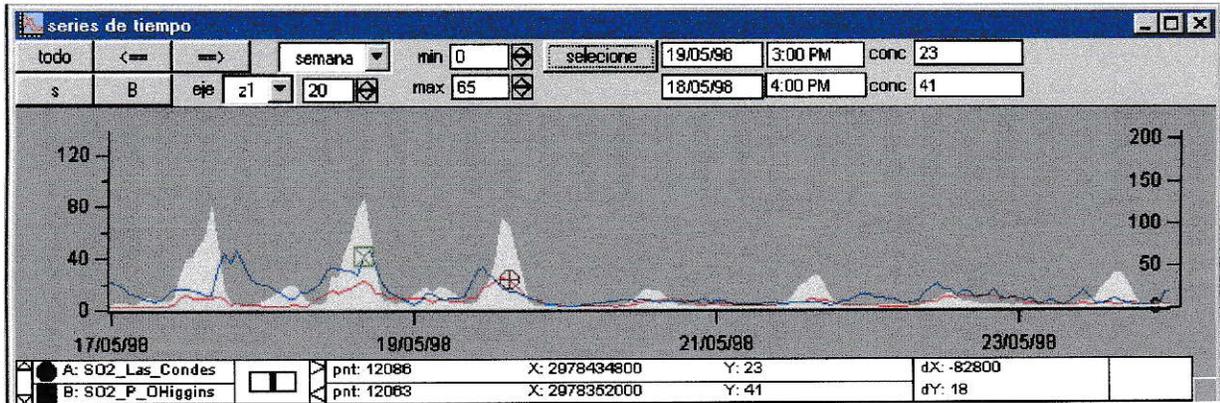


Figura N° 2 Ventana que despliega las series de datos en forma temporal, junto con herramientas (parte superior) que permiten al usuario desplazarse en el tiempo o consultar concentraciones puntuales (elaboración propia).

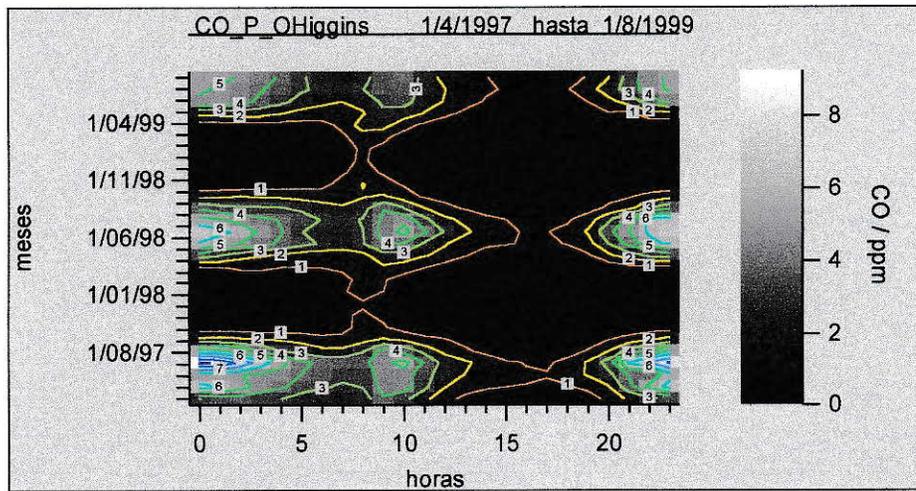


Figura N° 3 Ciclos diarios mensuales de CO durante 3 años (elaboración propia).

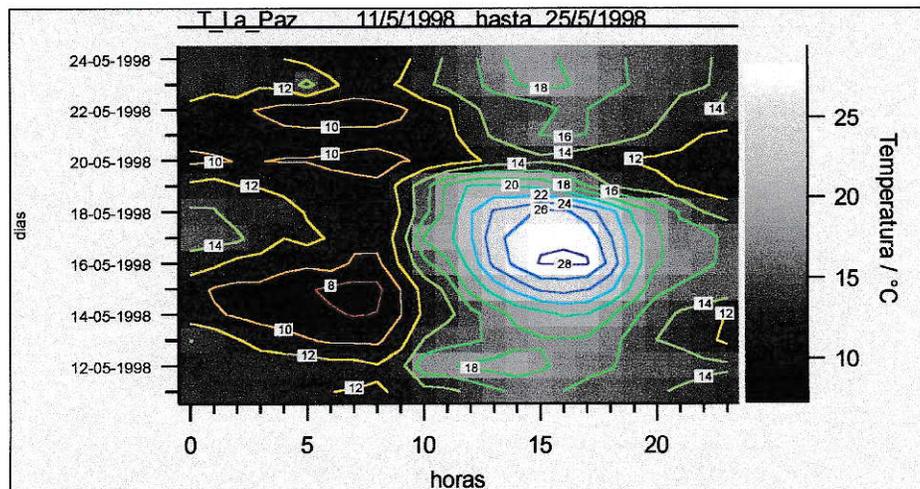


Figura N° 4 Ciclos diarios versus días desde el 11/5/95 hasta 25/5/1998 (elaboración propia).

Esta forma de graficar las concentraciones, tiene la ventaja de resaltar las variaciones diarias (ciclos diarios), de tal forma de poder comparar concentraciones, con condiciones ambientales similares (misma hora del día). Otra ventaja, es que se pueden visualizar largos períodos con mayor cantidad de información y en forma comprensible. La desventaja, es que las concentraciones deben ser observadas con menor precisión, que con los gráficos de una dimensión, debido a que hay que aproximar el valor a través de una escala de colores, ubicada al costado derecho del gráfico.

Junto con ello, se utilizaron herramientas de manipulación gráfica previamente desarrolladas en IGOR, que permiten extraer de los gráficos de ciclos diarios o anuales y presentar los datos en gráficos en una y dos dimensiones, análisis de frecuencias de concentración, entre otras.

4.2 Análisis de la distribución espacial

Esta ventana (*Figura N° 5*), permite animar los datos en forma espacial y temporal sobre una imagen del área de Santiago. Mediante colores, se recrea la concentración de la variable medida, hora a hora (para series de datos originales o ciclos diarios promedio), de las distintas estaciones de la red, junto con la velocidad y dirección del viento expresado como vector.

Al juntar el viento y la concentración de contaminantes, se puede visualizar el desplazamiento de los contaminantes a través del área geográfica cubierta por las estaciones.

También posee un panel de control que permite al usuario, entre otras cosas, cambiar el contaminante, seleccionar la fecha y el tiempo de retardo entre las imágenes.

La imagen del área de Santiago, está formada por 30 x 30 píxeles de 1 km², geo-referenciadas. El programa calcula valores de concentración para cada píxel, a partir de los valores observados en las estaciones, mediante método de interpolación / extrapolación, que pondera las concentraciones observadas en cada estación, según una función que disminuye con la distancia al píxel.

La expresión para calcular la concentración en el píxel i, j es:

$$Celda_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^k \left([contaminante]_n * \frac{1}{(distancia_{(x-i),(y-j)})^2} \right)}{\sum_{n=1}^k \left(\frac{1}{(distancia_{(x-i),(y-j)})^2} \right)}$$

Donde x e y , corresponden a la ubicación de las estaciones, n es el número de estaciones. Una de las características de la función de ponderación es que las concentraciones disminuyen con el cuadrado de la distancia.

Esta representación, es una potente herramienta para visualización de datos y análisis dinámico de las evoluciones temporales. No obstante, debe entenderse que es sólo una representación espacial basada en pocas observaciones (ocho estaciones), por lo cual pueden esperarse diferencias de concentración respecto a la realidad, especialmente hacia los bordes de la ciudad.

Por ejemplo, fuentes puntuales de contaminantes que se encuentren entre las estaciones, sólo podrán ser visualizadas por el programa una vez que la masa de aire del contaminante haya pasado por alguna de las estaciones de monitoreo.

4.3 Perfiles verticales de temperaturas y cálculo de altura de capa de mezcla

El perfil vertical de temperatura, es graficado hora a hora a partir de la interpolación de los puntos obtenidos por el perfilador LAP-RASS, más los tres sensores térmicos obtenidos desde una torre. Tanto la torre como el LAP-RASS, están ubicados en la estación de la estación de La Platina. El perfil de temperatura es recreado mediante una línea color amarilla y roja (*Figura N° 6*).

El concepto teórico que fundamenta el cálculo de altura de capa de mezcla será explicado en el Capítulo 6.2. Un algoritmo entrega un valor horario, que es desplegado en la parte superior derecha de la ventana de la *Figura N° 6* y almacenado en una función para su posterior análisis. La altura de capa de mezcla es generada a partir de la intersección entre el perfil térmico de temperaturas y la adiabática seca que representa al centro de la ciudad. La altura de capa de mezcla es un factor importante en el grado de ventilación de la cuenca, como se explicará más adelante.

También, se recrea el perfil térmico adiabático seco (línea punteada azul), a partir de la temperatura superficial de la estación de La Paz. Esta curva se asume que representa el perfil térmico del centro de la ciudad.

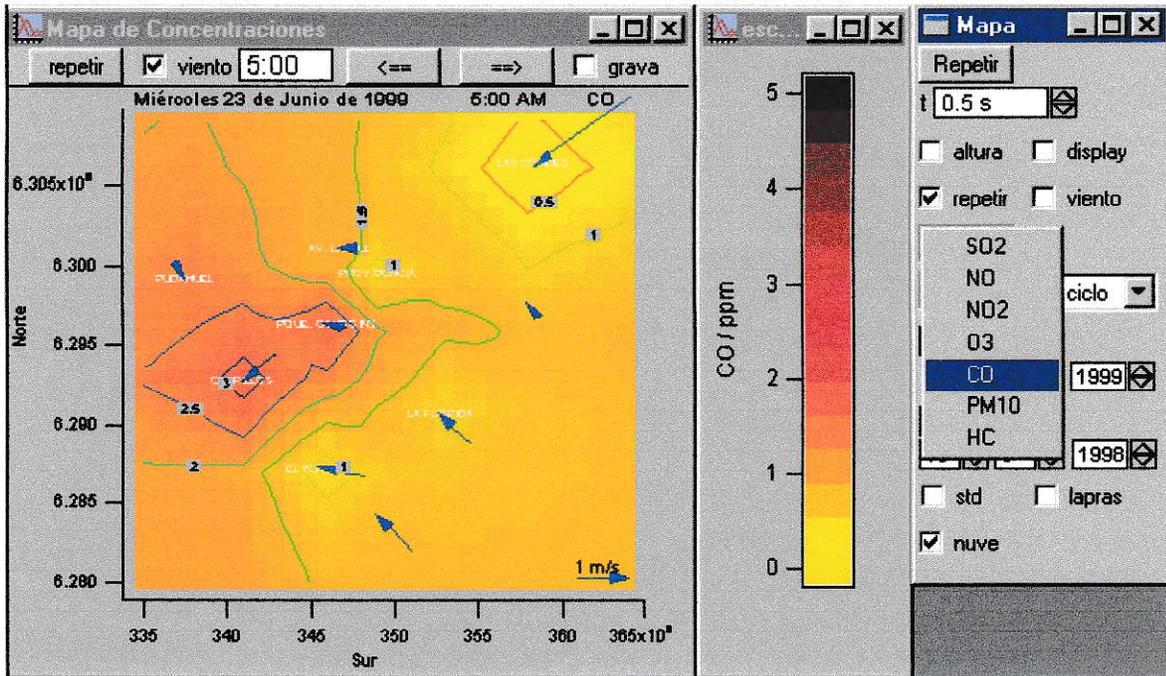


Figura N° 5 Ventana que despliega el comportamiento espacial de los contaminantes y la barra de herramientas que lo administra (elaboración propia).

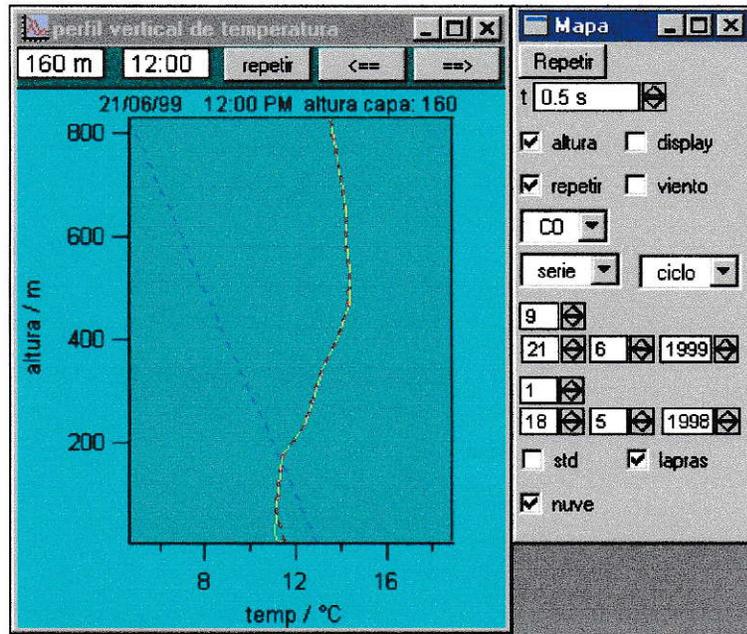


Figura N° 6 Ventana que recrea el perfil térmico medido por el LAP-RASS (línea amarilla), la adiabática del centro de Santiago (línea azul) y la altura de capa de mezcla (extremo derecho), calculada a partir de la intersección de las curvas (elaboración propia).

4.4 Estudio de relaciones entre variables meteorológicas y contaminantes.

Las tres ventanas, de la serie de tiempo, de la imagen del área de la ciudad y del perfil de temperatura (*Figura N° 7*), se unen para recrear la evolución temporal y espacial de un período cualquiera.

Esta forma de observar la información, tiene como ventaja el poder graficar en forma simultánea y de una manera comprensible, al menos 31 variables registradas por la red de monitoreo. Paralelamente, el usuario puede comparar las variables, permitiendo relacionar el aumento de la concentración con la disminución de la altura de capa de mezcla, o bien, observar la relación que existe entre el desplazamiento de un contaminante por la ciudad, con la dirección y velocidad del viento, entre otras.

En la *Figura N° 8*, se representan simultáneamente las concentraciones horarias de un contaminante (intensidad del color del píxel), con la velocidad y dirección del viento (tamaño y dirección de la flecha, respectivamente), entre el 4 de Mayo de 1999 y el 15 del Mayo de 1999.

También es posible graficar simultáneamente en coordenadas polares (*Figura N° 9*), la dirección y velocidad del viento (posición del punto) medidas en una estación, con la concentración de algún contaminante (tamaño y color del punto), para un período determinado.

Si bien los dos últimos gráficos representan informaciones similares (relación que existe entre la concentración de un contaminante con el viento), el primer tipo de representación (*Figura N° 10*) incorpora la escala temporal. Esto permite visualizar desfases en el tiempo que se producen entre el viento y la concentración en una estación cualquiera, como ocurre para el caso del SO₂, ejemplo que será analizado posteriormente.

Para estudiar las relaciones entre dos variables, comúnmente se grafica una en función de la otra. Esta aplicación permite además animar la relación temporal entre variables, de manera de poder analizar los ciclos diarios de las relaciones (por ejemplo, temperatura en función de la humedad) y su evolución a lo largo de los días (*Figura N° 10*). El color indica la evolución en el tiempo, el último punto en graficarse será el más claro y el primero será el más oscuro. También se puede escoger algunas horas determinadas para su representación, para obtener, en algunos casos, funciones lineales de los datos (*Figura N° 11*).

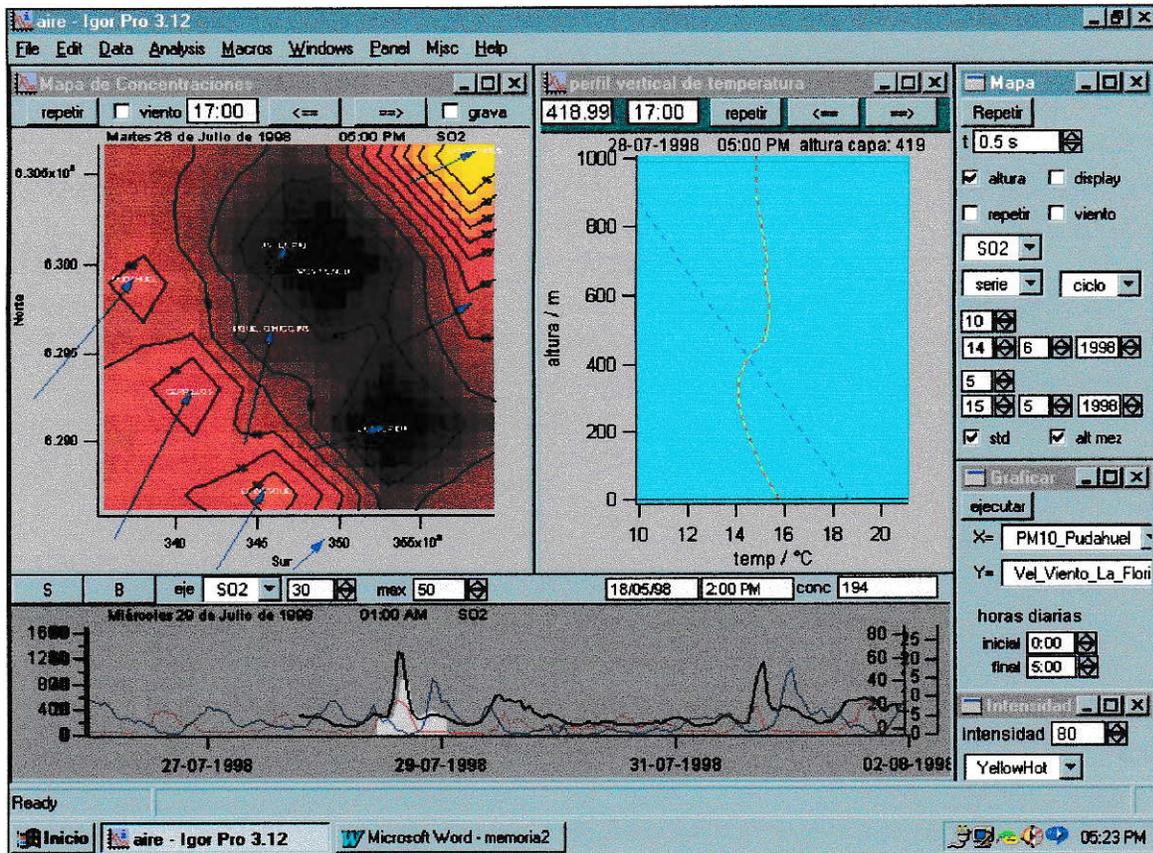


Figura N° 7 Capacidad del programa para desplegar simultáneamente, la altura de capa de mezcla, concentración en series de tiempo, concentraciones espaciales, dirección y velocidad de viento en cada estación (elaboración propia).

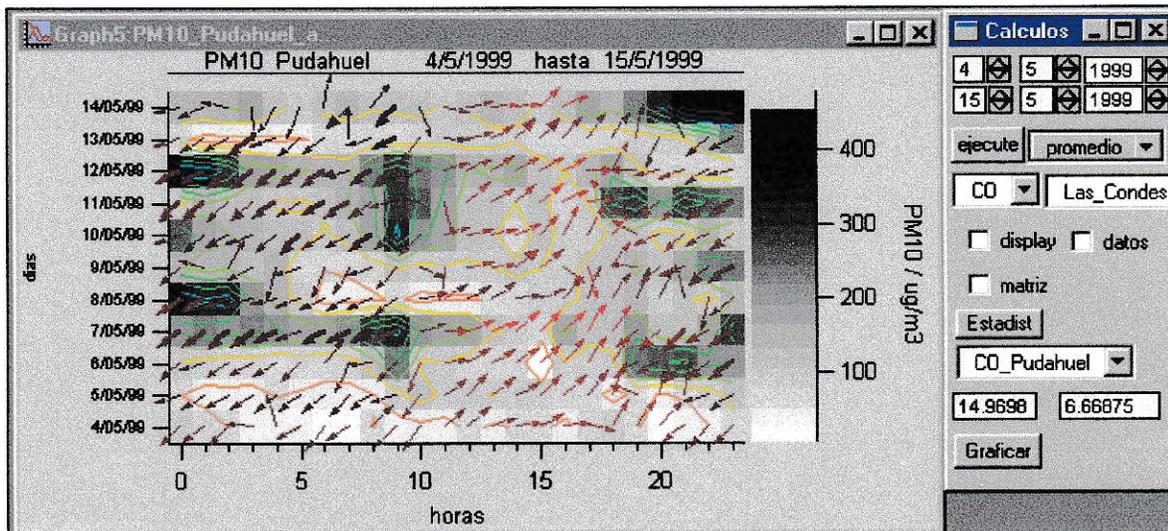


Figura N°8 Capacidad del programa para recrear series de datos y relacionarlas con el viento (elaboración propia).

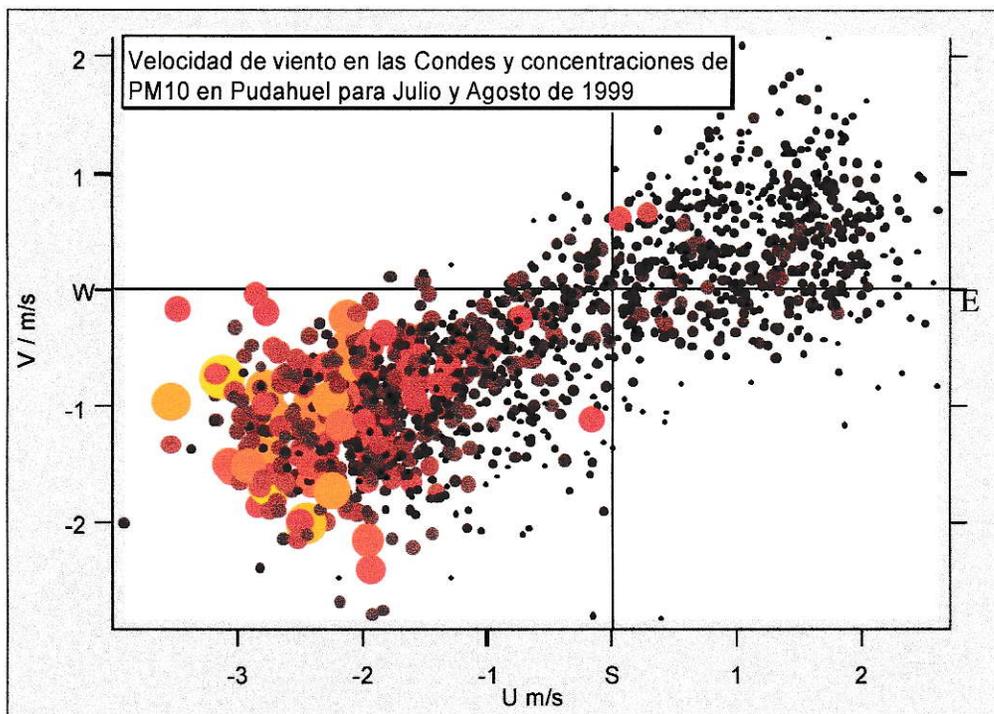


Figura N°9 Ejemplo dónde se grafica la velocidad y dirección de vientos en la estación de Las Condes (posición de cada punto) simultáneamente con la concentración de PM10 la cual aumenta al aumentar el tamaño del punto, entre Julio y Agosto de 1999 (elaboración propia).

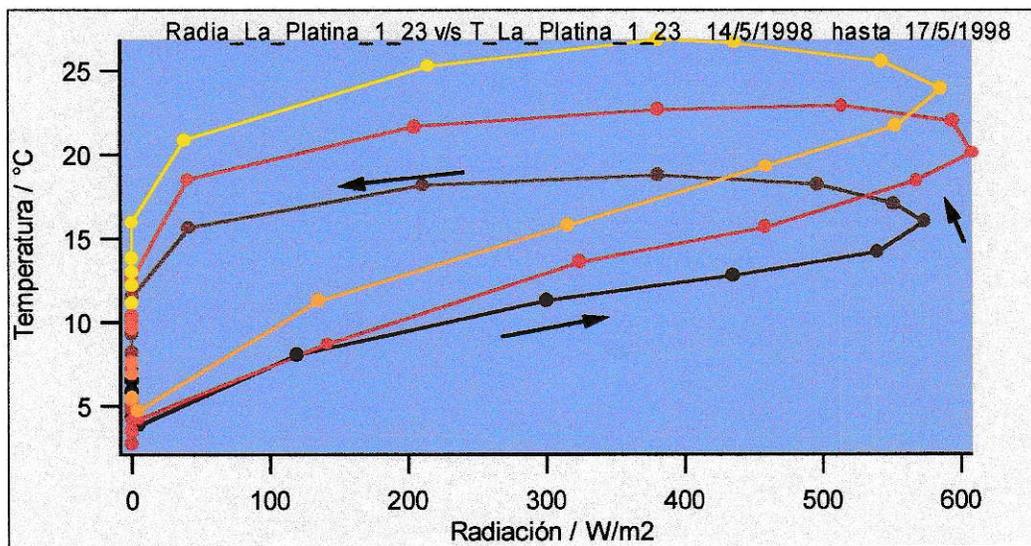


Figura N°10 Ejemplo que muestra la forma en que se relacionan radiación solar y temperatura en La Platina a lo largo de tres días (desde 14 de Mayo 1998 negro hasta 17 de Mayo 1998 amarillo) (elaboración propia).

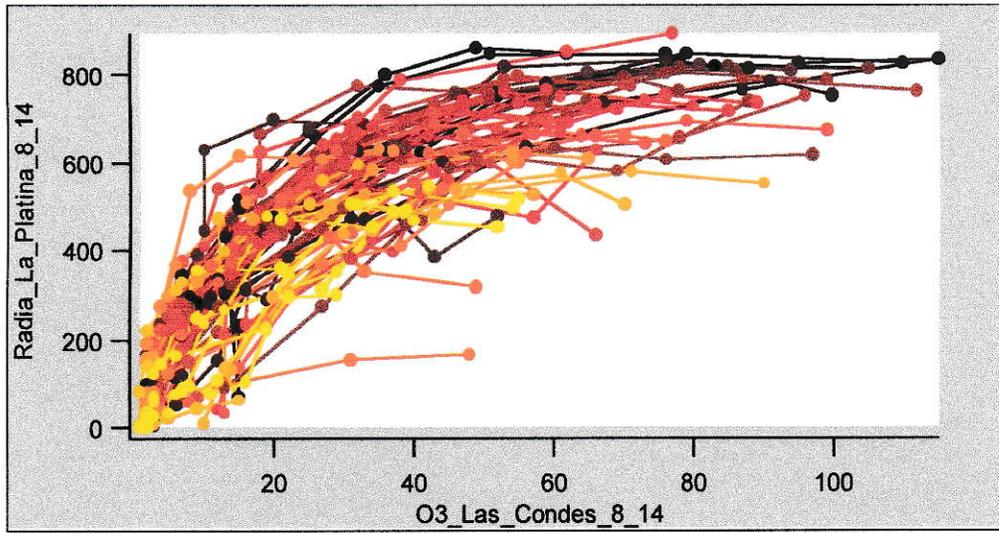


Figura N°11 Relación de la radiación solar con el ozono, en la estaciones de La Platina y Las Condes respectivamente; entre las 8:00 hrs y las 14:00 hrs para diferentes días con distintos colores (elaboración propia).

5 RELIEVE DEL ÁREA DE ESTUDIO

La topografía y las características de la superficie, son importantes al momento de estudiar la atmósfera, pues es el recipiente que la contiene y por lo tanto dará forma, restringirá su dinámica de movimientos e interactuará con la atmósfera a través de intercambios de calor y roce.

La cuenca atmosférica de Santiago, ubicada entre los 33.25 y 33.75 grados latitud Sur y los 70.75 y 70.5 grados de longitud Oeste, corresponde a una porción de la Depresión Intermedia rellena por sedimentos glacio-volcánicos arrastrados por los ríos Mapocho y Maipo. La cuenca tiene un fondo suave, entre los 400 y 700 m sobre el nivel del mar, hasta los pies de los cerros que la limitan (*Figura N° 12*).

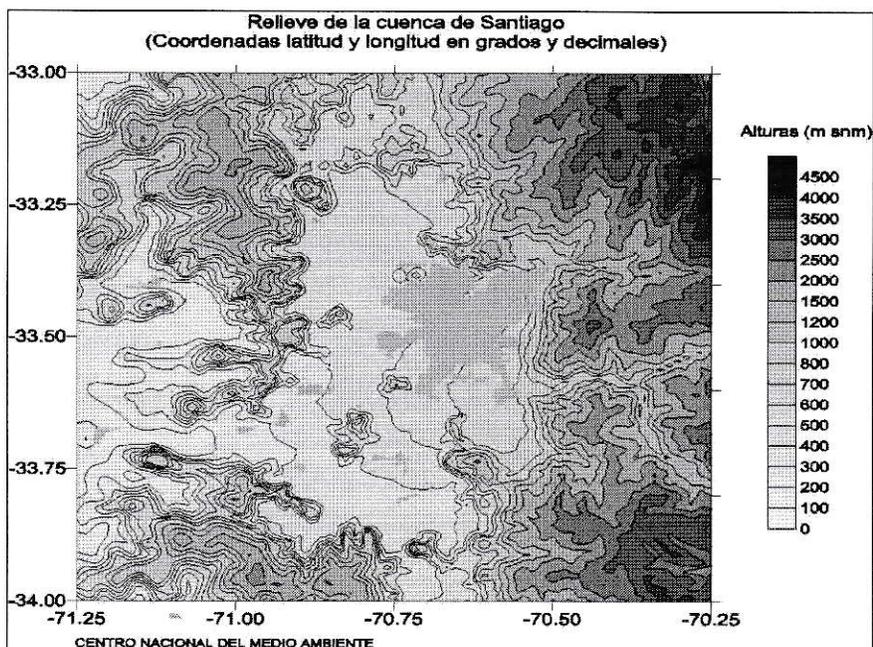


Figura N°12 Relieve de la cuenca de Santiago (fuente: CENMA, 1999)

Las dos principales formaciones que limitan la cuenca, son al Este la precordillera de los Andes y al Oeste la Cordillera de la Costa, las que están separadas en promedio por una longitud de 50 km de ancho (W-E). En el sector Norte de la cuenca, los cerros de la cuesta El Manzano se unen en forma de arco con los cerros de Colina. Al Oriente, los macizos precordilleranos de los Andes sólo son interrumpidos por la cuenca del río Mapocho y por la cuenca del Maipo, hasta la Angostura de Paine, donde se junta a los macizos de Alhue pertenecientes a la Cordillera de la Costa que cierran el valle por su lado Sur. En el lado Oeste, la cordillera de la Costa sólo se interrumpe con la cuenca del río Maipo (sector surponiente de la cuenca), cerrando el lado Poniente de la cuenca.

La ciudad de Santiago, se ubica al Norte del río Maipo, a los pies de la Cordillera de los Andes. Su clima tiene un carácter continental, debido a la barrera que constituye la Cordillera de la Costa para la penetración de aire húmedo desde el océano, permitiendo su entrada sólo en ciertas ocasiones.

6 VARIABLES METEOROLÓGICAS

Los contaminantes, emitidos desde la superficie o generados por reacciones químicas en la misma atmósfera, son transportados y dispersados por la dinámica atmosférica.

La atmósfera, es el macro - fluido que posee la mayor dinámica en la tierra, por lo tanto, los tiempos de residencia y desplazamiento que posee cualquiera de sus componentes será en promedio menor que en cualquier otro medio, como los océanos, o el suelo. Para fines de este trabajo, los períodos de análisis serán desde horas hasta años.

Para procesos de transformación termodinámica, una porción de aire de gran volumen puede ser considerada como un sistema adiabático, es decir, un sistema aislado que no intercambia calor con el entorno. Una consecuencia de lo anterior, es la disminución de la temperatura de las masas de aire que ascienden, causada por una expansión adiabática, fenómeno que se observa hasta los 1000 m.s.n.m., aproximadamente, cuando ocurre un proceso de convección por el calentamiento de la superficie.

La dinámica atmosférica, surge de la interacción de la radiación que llega desde el sol al planeta (*Figura N° 13*). Esta interacción, genera desbalances energéticos entre diferentes zonas y que tienden a ser equilibrados en gran parte, por desplazamientos de las masas de aire. De esta forma, los ciclos diarios y anuales, que afectan la ventilación de cualquier zona del planeta, están fuertemente influenciados por estos ciclos.

En la *Figura N° 13*, se observa tanto el ciclo diario como el ciclo anual de radiación solar, obtenido a partir de los datos de la estación de La Platina. Del gráfico se puede concluir que los períodos diurnos de verano, son más largos y se alcanzan mayores niveles de radiación que los de invierno.

Estas interacciones, pueden ser observadas tanto a escala global, como es la circulación general de la atmósfera, o a escala local o regional, como son la brisa de valle-montaña.

Uno de los factores importantes a considerar para la dispersión de contaminantes, es la turbulencia generada a partir de la interacción del aire con el suelo. La turbulencia, tiene relación directa con el grado de rugosidad de la superficie y con los intercambios de calor entre la superficie y la atmósfera.

El comportamiento de la atmósfera, puede ser descrito por factores meteorológicos como presión, velocidad y dirección del viento, nivel de turbulencia atmosférica y dispersión vertical (que afectarán el desplazamiento de una partícula), temperatura, humedad, intensidad de la radiación solar y precipitaciones (que serán determinantes en las transformaciones y remoción que sufrirá un contaminante).

Santiago, con relación a la circulación general de la atmósfera, se encuentra influenciado por el anticiclón del Pacífico Sur. El anticiclón, está relacionado con la zona de descenso de aire de la celda convectiva que se extiende desde el Ecuador hasta latitudes subtropicales. Debido a esto, las características típicas de la atmósfera sobre Santiago, son de aire seco y cálido (causado por las precipitaciones en zonas cercanas al Ecuador y por la compresión adiabática que se produce al descender el aire sobre Santiago).

Durante los meses de invierno (principalmente de Mayo a Agosto), se observan irrupciones de frentes polares. Estas son zonas de contacto entre masa polares y masas de aire más cálidas (anticiclones subtropicales), que generan inestabilidad atmosférica, causando en algunos casos precipitaciones (30 días/año como promedio en Santiago). Lo que da como resultado que el clima en Santiago sea templado - cálido, con una estación lluviosa corta.

6.1 Circulación atmosférica en la cuenca

Un gran porcentaje de la ventilación en la cuenca de Santiago, es generada por una circulación de mesoescala asociada a sistemas de brisas de valle montaña (*Figura N° 14*). Durante el día, el calor del suelo genera masas de aire cálidas y de menor densidad que ascienden por las laderas de los cerros, originando vientos que circulan de zonas de menor altura (valle) a mayor altura (laderas de cerros), alcanzando la máxima velocidad en las horas de la tarde. En cambio, durante la noche, la pérdida de calor del suelo (especialmente cerros y laderas) provoca que el aire cercano al suelo se haga más denso, y por lo tanto, descienda por las laderas hacia zonas más bajas (valles) y con una velocidad menor que la del día.

Los vientos en Santiago, durante el día, van desde el SW al NE (*Figura N° 15*), dirección dominante que se mantiene aún en las noches de verano, en las estaciones de Cerrillos, Parque O'Higgins y Pudahuel.

En cambio, durante la noche (*Figura N° 16*) las masas de aire descienden por las cuencas y laderas más cercanas. Por ejemplo, en la estación de Las Condes el aire desciende desde el NE por la cuenca del Mapocho y en estaciones como La Florida, La Platina, Cerrillos, Parque O'Higgins y el Bosque (en las tres últimas estaciones sólo en los meses de invierno), existe un movimiento del aire desde el S-E, en dirección a Pudahuel.

Una consecuencia de la circulación atmosférica local en la ciudad de Santiago, es que la renovación del aire en las noches de invierno en el sector Sur de la ciudad, es algo mejor que en el sector Norte, hacia dónde confluye aire de la ciudad desde el N-E y S-E. Para las estaciones céntricas de la ciudad, en las noches la dirección de los vientos tiende a ser más aleatoria, debido a su baja velocidad y la rugosidad propia de la ciudad.

En la *Figura N° 17* se distingue el cambio de dirección e intensidad del viento, entre el día y la noche, situación que varía a lo largo del año. Los vientos nocturnos tienen menor velocidad que los del día.

En resumen, Santiago durante el día presenta vientos predominantemente del Sur Oeste, que se intensifican en velocidad hasta las 18:00 hrs aproximadamente. Existe un incremento de la velocidad del viento diurno en la época estival. En cambio, en las noches, los vientos son de menor velocidad que los del día y con predominio de la dirección Este (ladera abajo). En las noches de invierno, se observa un aumento de las velocidades nocturnas, lo que refleja la influencia térmica del fenómeno.

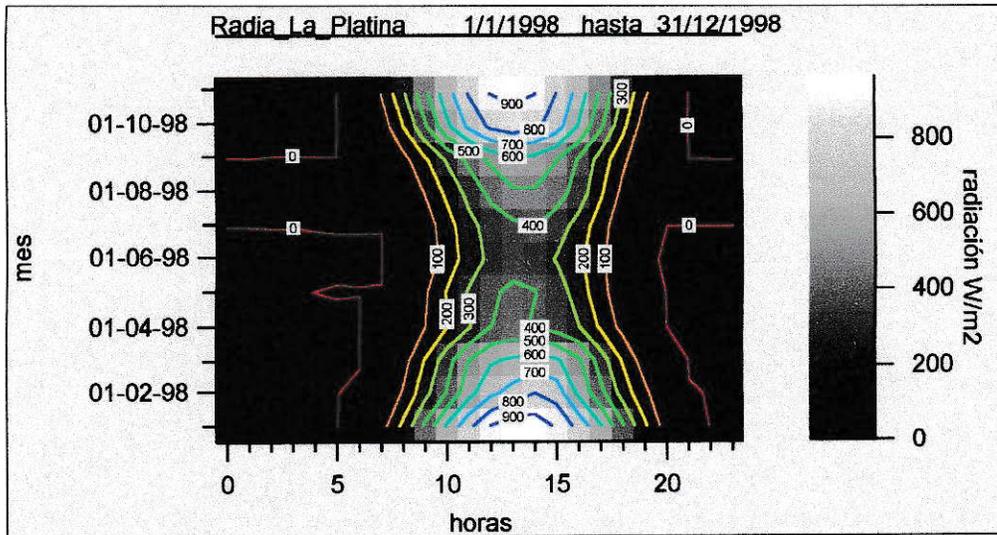


Figura N°13 Ciclo diario versus ciclo anual de la radiación incidente en la estación de La Plata en 1998(elaboración propia).

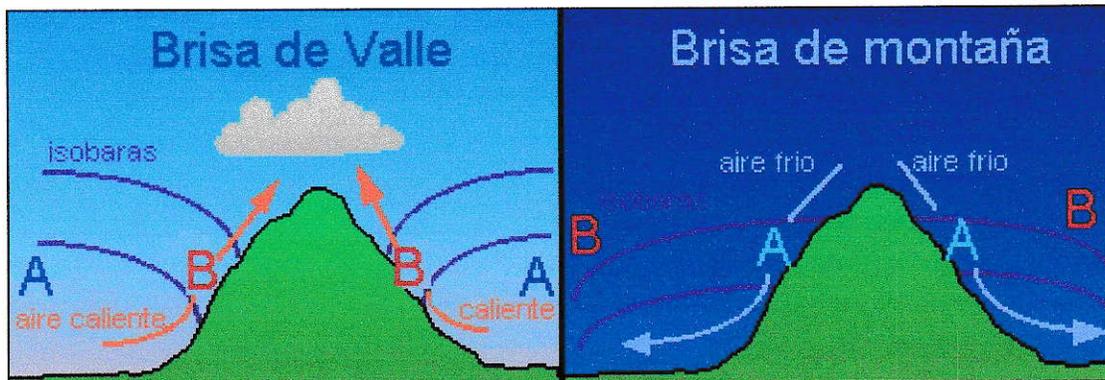


Figura N°14 Esquema que describe la circulación valle montaña (Fuente: Boyles et al, 1996).

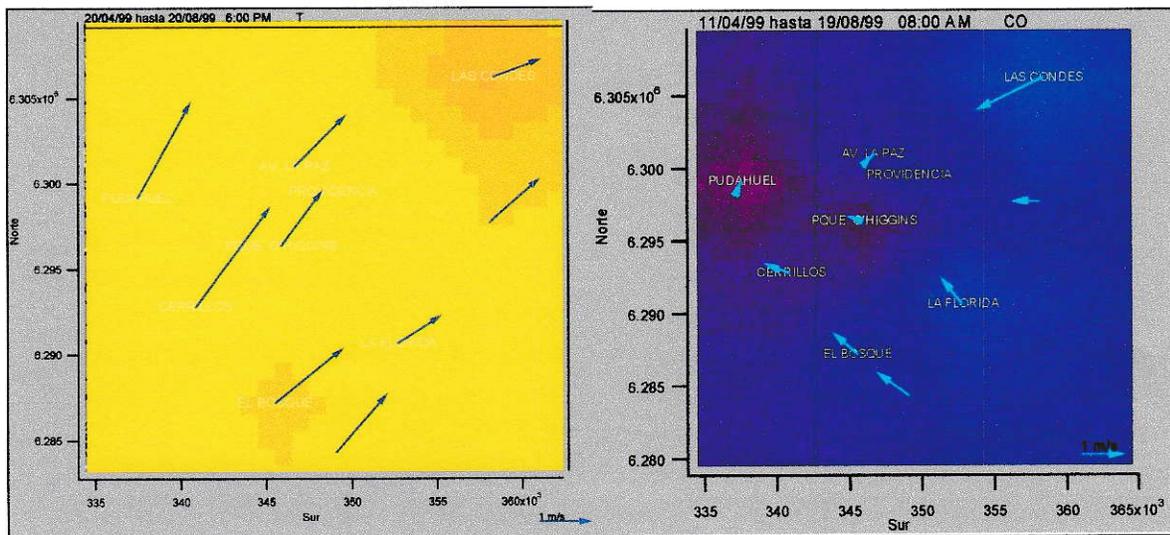


Figura N°15 y N°16 Circulación valle montaña promedio, para las estaciones de la red meteorológica (elaboración propia).

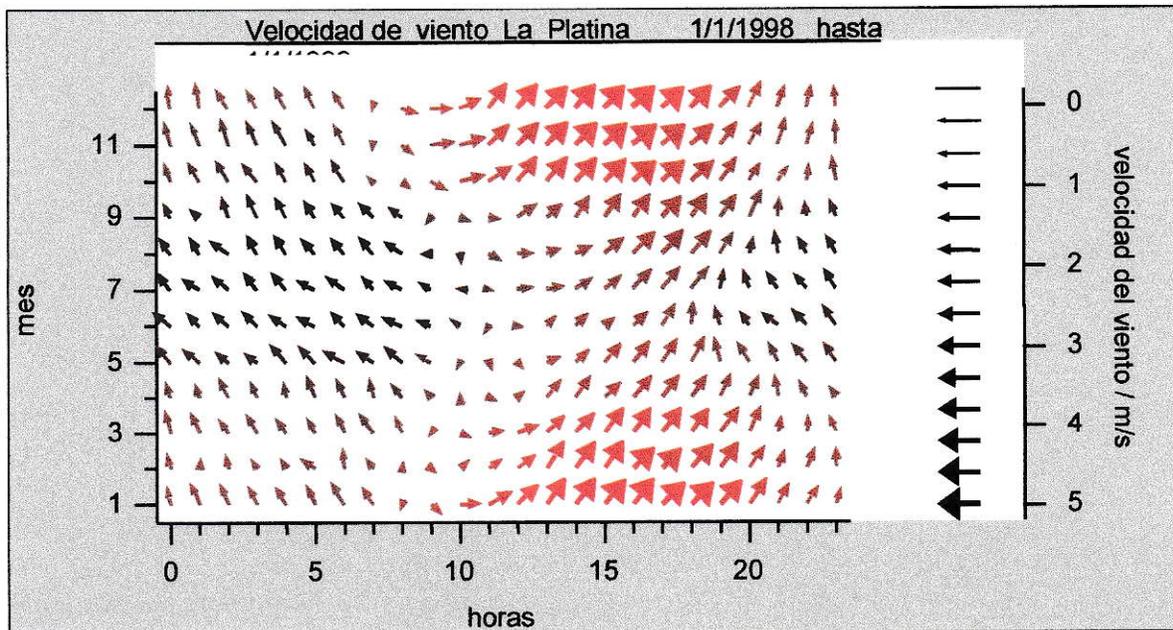


Figura N°17 Ciclo diario y anual de las velocidades y direcciones de vientos promedio (estación de La Platina 1998) (elaboración propia).

6.2 Altura de la capa de mezcla

Las concentraciones de contaminantes, son inversamente proporcionales al volumen de mezcla, el que está determinado, en su extensión vertical, por la altura de la capa de mezcla. En la capa mezclada, podemos suponer condiciones homogéneas de distribución de contaminantes.

Por este motivo, gran parte de la variabilidad observada de un contaminante se explica por el valor de la altura de capa de mezcla, la que, no se había estimado sistemáticamente para Santiago. En este trabajo se propone un método para calcular la altura de capa de mezcla de la ciudad, utilizando los datos obtenidos a partir del perfilador vertical de temperaturas y las temperaturas del centro de Santiago

La *Figura N° 18* muestra la zona de mezcla, generada por la convección natural que se produce al ascender, desde el suelo, masas de aire caliente con menor densidad, hasta encontrarse con una inversión térmica, que define la altura de capa de mezcla. El calor transferido desde el suelo al aire cercano, es una fracción del calor es generado por la transformación de la radiación solar incidente, en energía calórica. Por lo tanto, aumentos de los niveles de radiación favorecerán un aumento de la altura de capa de mezcla.

Debido a la disminución de la presión del aire con la altura, se produce una expansión adiabática de la masa de aire en su ascenso, lo que resulta en una disminución de la temperatura del aire con la altura.

En la noche, se produce el efecto contrario al del día y el suelo comienza a enfriar paulatinamente las capas más cercanas de la atmósfera, generando un perfil estable (inversión térmica), que se incrementa en altura hasta que comienza nuevamente el suelo al recibir radiación solar.

Sin embargo, la misma actividad de la ciudad de Santiago libera calor, cuyos efectos se notan mejor durante la noche, en ausencia de radiación solar (efecto isla térmica), creando una

zona de mezcla convectiva de baja altura (menor a los 100 metros de altura durante la noche, sobre el suelo de Santiago aproximadamente).

Basándose en los razonamientos previos, se desarrolló un modelo empírico teórico, que calcula hora a hora el valor de altura de capa de mezcla, a partir de los datos obtenidos del LAP-RASS y las temperaturas superficiales en las estaciones de La Platina y La Paz

El modelo ocupado para el cálculo de la altura de capa de mezcla supone:

- Una zona de mezcla convectiva, desde la superficie hasta una altura calculada por la intersección de la adiabática seca de la ciudad, con el perfil térmico medido por el LAP-RASS (*Figura N° 19*). Esta forma de estimar una altura de mezcla, tiene similitud con el método propuesto por Holzworth, 1972, que usa un perfil de temperatura obtenido al amanecer y la temperatura máxima observada en la superficie (en la tarde), para calcular la altura máxima de la capa de mezcla durante el día. El método usado en esta investigación, tiene la ventaja de disponer de perfiles verticales de temperatura de cada hora (medidos por el equipo LAP-RASS)

- El grado de estabilidad atmosférica, está determinado únicamente por el perfil térmico. No se utiliza algoritmo que incluya el efecto asociado al perfil de vientos. Esto simplifica y acelera el programa. Sin embargo, podría traer, entre otras consecuencias que los valores obtenidos se alejaran del valor real, causado por un empuje térmico mayor al esperado o un valor de temperatura superficial erróneo.

- La temperatura superficial de la estación de La Paz, se elige para representar la temperatura de Santiago. A su vez, los datos obtenidos del LAP-RASS, describen en mejor forma el perfil térmico regional. Esto se justifica observando las tendencias térmicas de las estaciones de la red, donde estación de La Paz es la que registra las mayores temperaturas. La Platina, está lo suficientemente retirada del centro de la ciudad como para suponer que el efecto calórico de la misma no la está afectando significativamente.

- El tamaño de Santiago, hace posible suponer que el volumen del aire que asciende convectivamente, es lo suficientemente grande para desprestigiar la mezcla que existe en las orillas y considerarla un sistema adiabático.

Se desprestigia la humedad del aire de manera de simplificar el cálculo. Esto podría afectar la pendiente de la curva adiabática, generando en última instancia, una altura de capa de mezcla mayor a la calculada.

El cálculo de altura de capa de mezcla, se puede dividir en 4 pasos para una mejor comprensión.

- A partir de los datos térmicos recolectados por el perfilador (veintiocho entre los 100 y 1.700 m de altura), más los tres datos de temperaturas (a 2, 8 y 22 m de altura) en la estación de La Platina, se interpola una curva polinomial de manera de generar 30 nuevos puntos equidistantes entre sí.

- De los datos térmicos registrados en la estación de La Paz, se calcula un perfil adiabático de temperaturas.

- El algoritmo desarrollado para estimar la altura de capa de mezcla, busca la intersección entre las dos curvas mediante un método de mínima diferencia. Una vez encontrada la intersección, se calcula la altura de capa de mezcla.

- Paralelamente, existen una serie de algoritmos y funciones que permite validar previamente los datos, de manera que los resultados sean confiables.

- Finalmente, los datos son almacenados en la base de datos del programa, permitiendo manipularlos y analizarlos.

Los resultados de esta metodología, han sido validados mediante la comparación con resultados obtenidos en observaciones hora a hora del perfil térmico, analizados en forma subjetiva por metereólogo del CENMA. Los valores de entrada son los mismos para ambos casos. Se ocuparon los resultado de un período de 20 días correspondiente a la época de Mayo de 1998.

En la *Figura N° 20* se resume los resultados de la altura de capa de mezcla, en el se representan alturas de cada hora del día de cada mes, de los que se puede concluir:

- Las alturas de capa de mezcla nocturna menores a 100 m, son producidas por una pequeña convección generada por la ciudad (efecto isla térmica), que rompe los primeros metros de la capa estable nocturna (inversión térmica nocturna).

- Durante el día la convección generada por la radiación solar comienza a destruir paulatinamente la capa estable nocturna, desde la superficie hasta llegar generalmente, a la base de la inversión térmica de subsidencia; estimándose las mayores alturas de capa de mezcla en las tardes de los meses de verano (mayores a 1.200 m en Enero a las 14:00 hrs) y en invierno alturas que no superan los 400 m como promedio.

- Al atardecer comienza a enfriarse la superficie del suelo, generando un perfil estable desde el suelo hacia arriba; esto causa malas condiciones de mezcla vertical durante toda la noche y una rápida disminución de la altura de capa de mezcla.

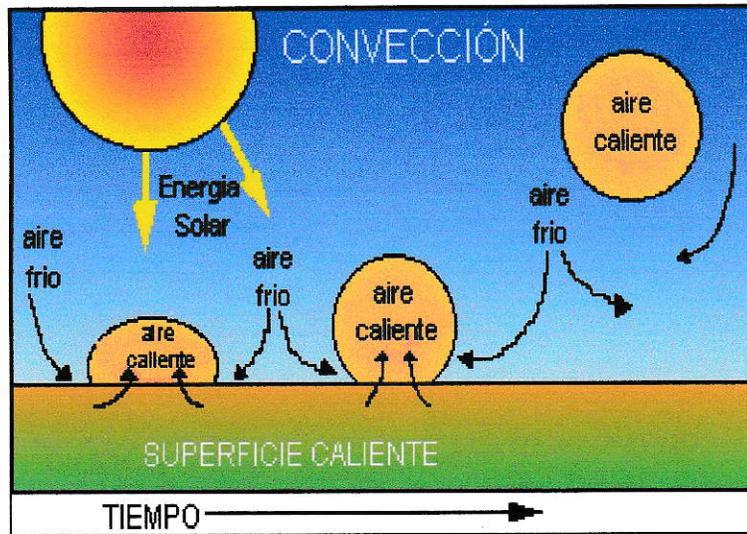


Figura N° 18 Esquema que explica el mecanismo de convección atmosférica por efecto de la radiación solar (Fuente: Boyles et al, 1996)

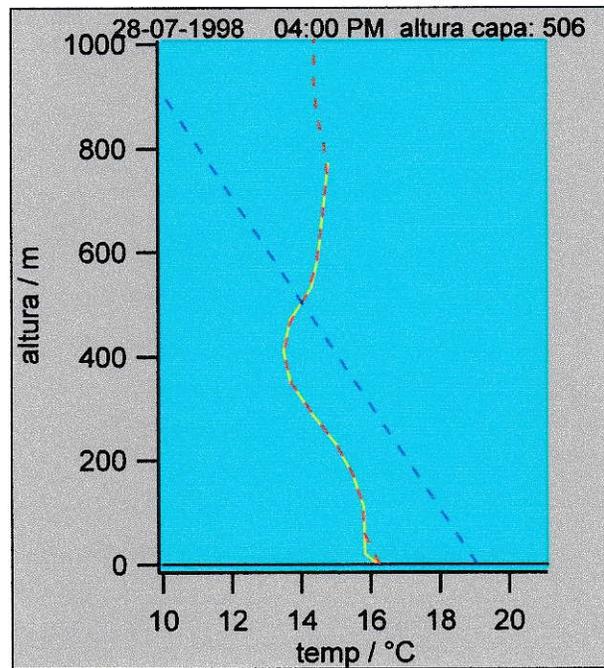


Figura N°19 Gráfico que muestra el perfil de temperaturas, la adiabática seca (generada a partir de la estación de La Paz) y la altura de la capa de mezcla (506 m de altura sobre el suelo) para el 28/7/1998 a las 16:00 hrs., en la ciudad de Santiago (elaboración propia).

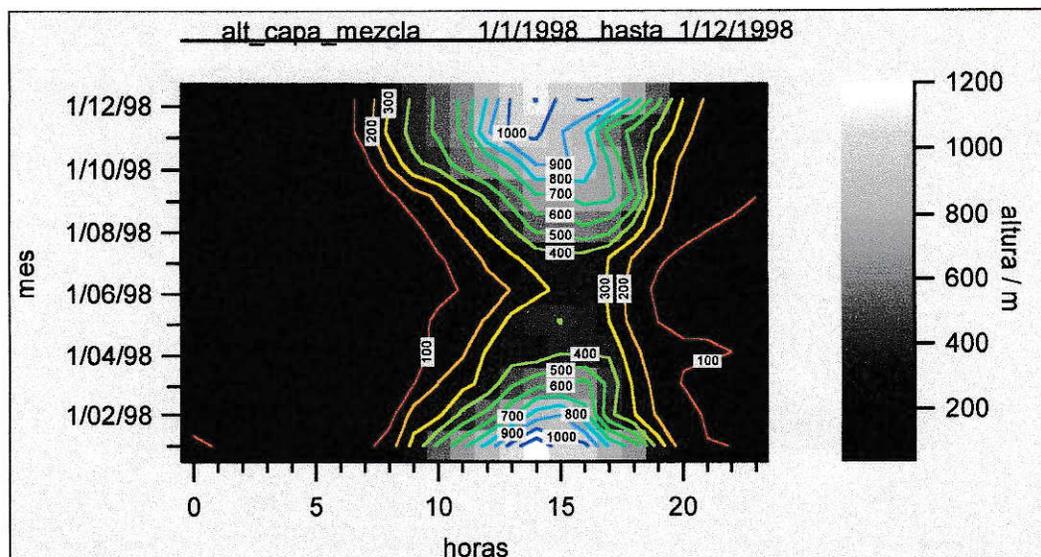


Figura N° 20 Gráfico de la altura de capa de mezcla, dónde se observan los ciclos diarios y anuales promedio para el año 1998, obtenidos a partir del modelo generado en el trabajo (elaboración propia).

6.3 Condiciones sinópticas asociadas a episodios de contaminación.

Las condiciones meteorológicas de gran escala, asociadas a los episodios de contaminación más importantes para Santiago, están relacionadas con la irrupción de una dorsal cálida en la tropósfera media con orientación NW-SE sobre el valle central (Merino, 1998). En la superficie se genera una depresión costera (área de baja presión, representada por la letra **B**), ubicada sobre la zona Norte del país (*Figura N° 21*). En el sector S-E de la depresión, predominan vientos del Este, que descienden por la cordillera, provocando una compresión adiabática de la tropósfera baja, generando aire cálido y seco, que causa una inversión térmica en altura, días de mayor radiación y noches mas frías por la falta de humedad. El descenso del aire cálido hacia la superficie, reduce la capa de mezcla superficial y aumenta la estabilidad vertical de la atmósfera. A esta condición meteorológica se la ha denominado episodio **tipo A**.

Los fenómenos sinópticos de gran escala limitan y modula directamente los fenómenos meteorológicos de escala local. Por ejemplo, la inversión térmica de subsidencia limita la altura de mezcla máxima sobre Santiago.

La configuración **Tipo A**, responsable de un 67 %, 59% y 67% de los casos de episodios contaminación observados en Santiago entre Abril y Septiembre para los años 1997, 1998 y 1999 respectivamente (Sarabia 2000). Las concentraciones de PM10 promedio para todas las estaciones, superan los 150 ug/m³ (*Tabla N° 3*). Las concentraciones del sector Poniente de la ciudad, el más afectado durante la noche, descienden desde 192 ug/m³ el año 1997 hasta 143 ug/m³ en 1999.

Otra configuración de mala ventilación es el **Tipo BPF**, registrándose altas concentraciones de contaminantes en toda la ciudad, pero por períodos mucho más cortos (horas) y con menor frecuencia que el episodio Tipo A.

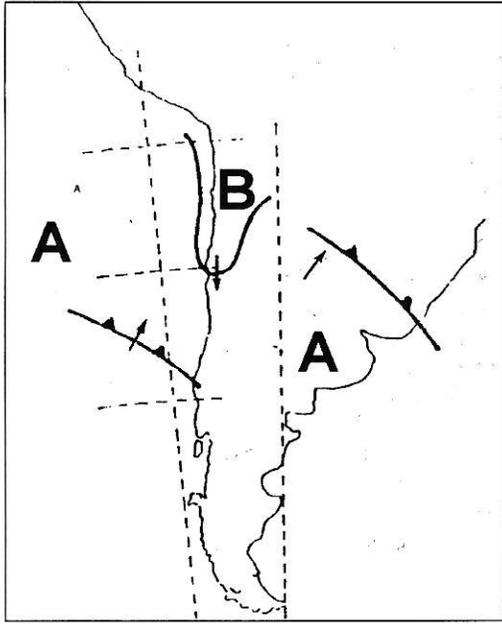


Figura N° 21 Condiciones sinópticas a nivel superficial para un episodio de tipo A, donde se observa un área baja de presión (letra B) sobre la zona central y junto a ella dos áreas de alta presión (letra A) . (propuesto por Rutland y Garreud 1995).

Tabla N° 3 Condiciones sinópticas y promedio de las concentraciones de PM10 para el período entre Abril y Septiembre.

Episodios	1997				1998				1999			
	N° días	%	PM10 ug/m ³	D Std ug/m ³	N° días	%	PM10 ug/m ³	D Std ug/m ³	N° días	%	PM10 ug/m ³	D Std ug/m ³
Tipo A	36	67	192	39	22	59	159	24	24	67	143	14
Tipo BPF	18	33	195	35	15	41	159	19	12	33	145	25
Total	54		193	38	37		159	29	36		144	19

(Fuente: Sariabia 2000)

7 COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES MEDIDOS EN SANTIAGO

La contaminación atmosférica, es el resultado de las relaciones que tiene el sistema atmósfera con el medio que lo rodea y que se observa químicamente como un cambio en la concentración y composición molecular habitual (*Figura N° 22*).

Estas interacciones son provocadas principalmente por:

- Las fuentes emisoras, tanto naturales como antrópicas, que aportan contaminantes a la atmósfera.
- La energía irradiada por el sol, que origina un calentamiento diferencial de la superficie, provocando el desplazamiento de masas de aire y provee la energía requerida para las reacciones fotoquímicas.
- La forma y estructura de la superficie que guía los movimientos del aire, intercambian momentum, calor y masa con la atmósfera.
- Las interacciones entre contaminantes, tanto físicas como químicas.

Hablamos de contaminación atmosférica si dichas interacciones alteran las relaciones de la atmósfera con los seres vivos.

Las fuentes antrópicas son uno de los factores que más importan al momento de referirnos a la contaminación, debido a que es una variable manejable por el hombre. Además puede constituirse en un cambio nuevo y brusco al sistema y, por lo tanto, de lenta adaptación para los distintos factores (principalmente los seres vivos) que conviven o interactúan en la atmósfera.

Debido a que el comportamiento de una variable en la atmósfera (ejemplo CO), depende de una red de relaciones con otras variables (ejemplo: viento, temperatura, etc.) y de sí mismo (sistema cibernético o de retroalimentación), resulta sumamente complejo describir y predecir su comportamiento. El problema debe ser abordado desde una perspectiva holística o sistémica.

Por último, todas estas variables definen el tiempo residencia y evolución que sufrirá un contaminante en la atmósfera o en una porción de ésta (*Tabla N° 4*).

Las concentraciones de contaminantes en la atmósfera y sus tiempos de residencia son el resultado de:

- Tasas de emisión de contaminantes
- Volumen de mezcla.
- Transporte.
- Reactividad del medio y del contaminante consigo mismo.

Estas acciones surgen de la interacción de cuatro factores básicos: radiación solar, superficie del suelo, factores meteorológicos de gran escala y emisiones.

Tanto la dispersión como el volumen de mezcla afectan de forma similar durante cortos períodos, a todos los contaminantes emitidos dentro de la ciudad; en cambio, la reactividad y las emisiones darán a cada contaminante un patrón distintivo, que los agrupará o diferenciará del resto de los contaminantes.

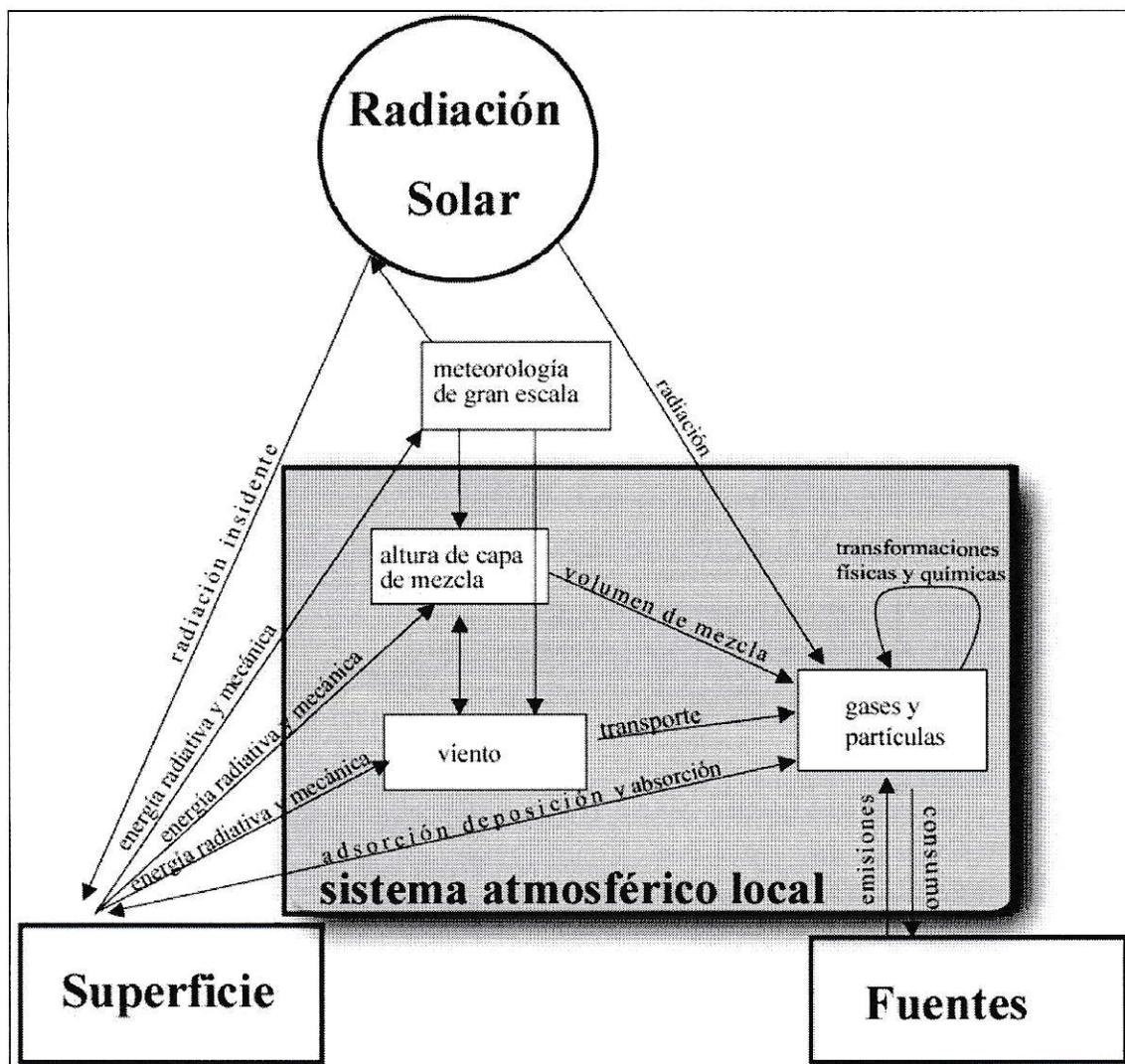


Figura N°22 Esquema sistémico conceptual propuesto en este trabajo, para explicar las concentraciones observadas en Santiago (elaboración propia).

Tabla N° 4 Concentración habitual y tiempos de recambio para los principales contaminantes (Gallardo, 1997).

Compuesto	Razón de mezcla ppm	Tiempo de Recambio
Nitrógeno molecular N ₂	780800	millones de años
Oxígeno molecular O ₂	209400	miles de años
Dioxido de carbono CO ₂	355	aprox. 4 años entre la atmósfera
Neon Ne	18.2	millones de años
Oxido nitroso N ₂ O	0.3	aprox. 150 años
Metano CH ₄	1.7	10 años
Monóxido de carbono CO	0.15	aprox. 6 meses
Ozono O ₃ troposfera	0.02	aprox. 1 mes
Ozono O ₃ estratosfera	0.02-1.0	Variable
Hidrocarburos (no CH ₄)	0.01	algunos días
Oxidos de nitrógeno NO _x	0.0005	algunos días
Freon 12 CF ₂ Cl ₂	0.0004	aprox. 100 años
Dióxido de azufre SO ₂	0.0002	algunos días
Sulfato particulado SO ₄ ²⁻	0.7	algunos días
Acido sulfhídrico H ₂ S	0.0001	algunas horas

7.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

7.1.1 Antecedentes generales

Contaminante principalmente primario, que resulta de la combustión incompleta de compuestos orgánicos. También es producido en menor grado por la fotólisis de formaldehído (Osif y Heicklen, 1976) o la oxidación de otros HC (origen secundario).

Es un gas incoloro, inodoro, pero peligroso para la salud humana, debido a su efecto tóxico, por la gran afinidad a la hemoglobina, generando una disminución de la capacidad de transporte del oxígeno por la sangre, afectando la respiración celular.

La concentración global de CO, está entre 40 a 200 ppb. Se estima que dos tercios de la concentración de CO es producida por emisiones antrópicas. La mayor fuente natural la constituye la oxidación de metano (CH₄) (Tabla N°5).

El tiempo de residencia estimado en la atmósfera está entre 30 y 90 días (Bernard Weistock, 1969).

Tabla N° 5 Emisiones globales estimadas de CO.

Fuentes	Emisiones estimadas M Ton (CO)/año
Oxidación CH ₄	400-1000
Oxidación de hidrocarburos no metánicos	200-600
Actividad microbial en océanos	20-200
Emisiones desde vegetales	60-160
Quema de biomasa	300-700
Tecnológicas	300-550
TOTAL	1300-3210

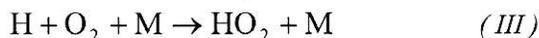
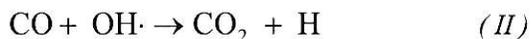
(Fuente de información IPCC 1995)

Tabla N° 6 Consumos globales estimados de CO

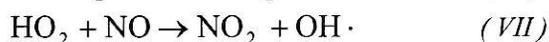
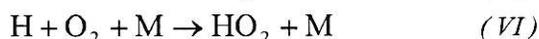
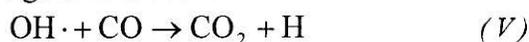
Consumo	Rango M Ton (CO)/año
Reacción con OH	1400-2600
Captación del suelo	250-640
Pérdida estratosférica	~100
TOTAL	1750-3240

(Fuente de información IPCC 1995)

El mayor sumidero de CO, es la reacción con el radical OH (Tabla N° 6) para formar CO₂, como se muestra en la siguiente ecuación:



La oxidación del CO puede también promover la oxidación del NO a NO₂ (Glasson, 1971), la que ocurre en la siguiente secuencia:



En simulaciones de atmósferas contaminadas (Calvert y McQuigg, 1975), se observó que el CO provoca una disminución moderada de las concentraciones de OH (50 ppm de CO reducen los OH a la mitad), debido a la velocidad de reacción de ambos ($2 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{molécula}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$), causando un descenso de los niveles de O₃ y PAN (peroxi acetyl nitrato).

En Santiago, es monitoreado en las ocho estaciones en forma continua, mediante equipos basados en el método de filtro de correlación gaseosa

La concentración promedio de Santiago, para los tres años de monitoreo en la red MACAM 2, medida en la estación de Pudahuel entre 1 de Abril de 1997 al 1 de Enero de 1999, es de $1,7 \pm 2,6$ ppm. El transporte es la principal fuente de emisión, con un 92,3 % de un total estimado de 244.922 ton*año⁻¹ (*Tabla N° 7*).

Tabla N° 7 Estimación de emisiones de CO para la ciudad de Santiago durante el año 1997.

Actividades y fuentes relacionadas con	CO Ton / año
Transporte	225992
Industria, comercio, construcción	4303
Agricultura	9493
Domésticas	5134
Polvo resuspendido	0
TOTAL	244922

Fuente: CONAMA-RM, 1998

Las emisiones de CO presentan una distribución relativamente homogénea, que decrece desde el centro hacia la periferia (Fernández, 1999), como se observa en la *Figura N° 73*. Se ha estimado que los vehículos gasolinero son la principal fuente con un 90% de las emisiones, al compararla con la emisión de vehículos diesel.

Debido a que un 92% del CO es emitido por el transporte, podría considerarse como un buen trazador de la actividad vehicular.

7.1.2 Ciclo diario promedio de CO

Anualmente se observan altas concentraciones de CO, en los meses de otoño e invierno (Marzo a Septiembre), con un máximo en el mes de Junio. En cambio, las menores concentraciones de CO, son en primavera y verano; lo que permite distinguir la fuerte influencia del ciclo anual y diario de ventilación de la cuenca, sobre un contaminante primario como el CO, para el que se estiman emisiones relativamente constantes durante el año (*Figura N° 23*).

El ciclo diario de CO, presenta dos máximos o incrementos de concentración. Uno diurno, entre las 7:00 hrs. y las 11:00 hrs. y otro nocturno de mayor duración que comienza alrededor de las 18:00 hrs. y termina a las 4:00 hrs..

El primer máximo de concentración, es producido por un aumento de la circulación vehicular y una menor ventilación, causada por la inversión térmica de la madrugada y los menores vientos.

El máximo nocturno, se asocia principalmente a la disminución de la capa de mezcla, un segundo aumento de la densidad vehicular y una disminución y cambio de dirección de los vientos, generando acumulación y recirculación de los contaminantes emitidos durante el día.

En la tarde las concentraciones de CO, en casi toda la ciudad, experimentan una disminución provocada por el aumento de la ventilación en la cuenca.

El máximo de la mañana se observa durante todo el año, en cambio el máximo nocturno sólo aparece a partir de Marzo hasta Octubre, con un máximo en el mes de Junio.

Durante el año, el máximo de la mañana sufre un retraso temporal de hasta dos horas entre invierno y verano (*Figura N° 24*). Esto es producido, en parte, por un cambio de horario de las emisiones antrópicas, las que sufren un retraso cuando adelantamos el reloj al horario de invierno (las personas se movilizan una hora mas temprano en verano que en invierno). Otro factor que puede influir en el cambio horario del máximo de la mañana, es una mayor duración de la ventilación, causada por días luz más largos en verano que en invierno.

A medida que nos acercamos al mes de Junio (invierno), la diferencia temporal entre el máximo de la noche con el de la mañana se hace más pequeña, lo que es provocado, probablemente, por una disminución del tiempo de ventilación de la cuenca, situación relacionada con la menor radiación solar.

El máximo nocturno, en los meses de invierno, tiene una mayor duración y más altas concentraciones promedio que el de la mañana, especialmente durante el mes de Junio. La baja ventilación es el factor asociado, que impide la renovación del aire de la cuenca.

Las Condes es la estación que registra las menores concentraciones de CO. En ella se observa un incremento de las concentraciones diurnas hasta las 20:00 hrs. (*Figura N° 25*), lo que provoca que el máximo de la mañana tenga una intensidad muy baja, al compararlo con el de la tarde. Esto se debe, a que el principal aporte de contaminantes sobre esta zona es el transporte por la brisa de valle, desde el centro de la ciudad hacia el sector noreste de Santiago.

Si bien las series de tiempo presentan una alta variabilidad, ésta disminuye notablemente al seleccionar una hora en particular, como se muestra en la *Figura N° 26*. Al seleccionar una hora en particular se puede observar la variabilidad producida principalmente por la variables meteorológicas, si consideramos constantes las emisiones de un día a otro.

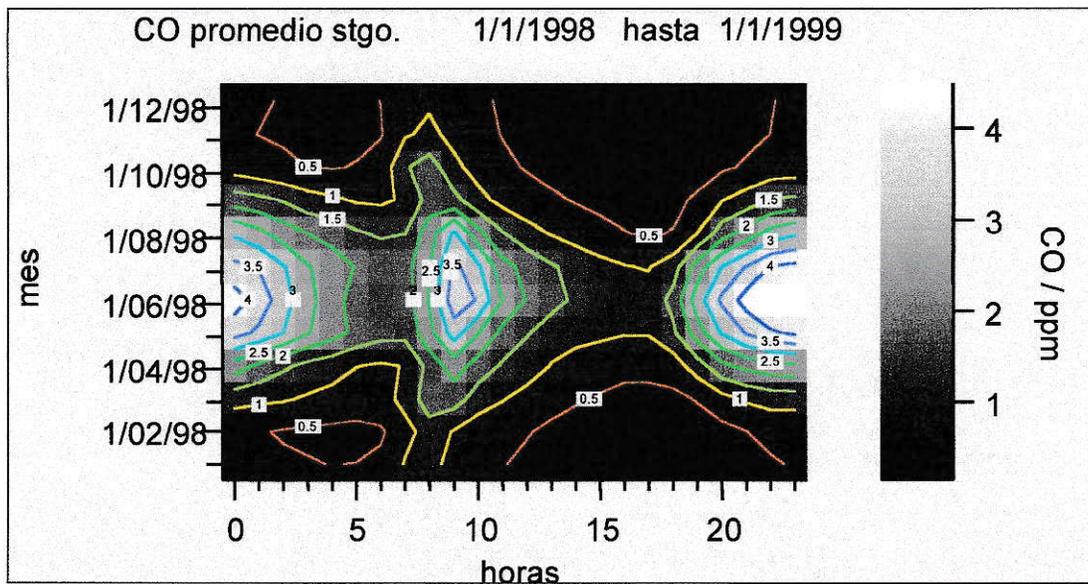


Figura N° 23 Ciclos diarios versus el ciclo anual de CO para el año 1998. En el se muestra el comportamiento diario y anual del CO (elaboración propia).

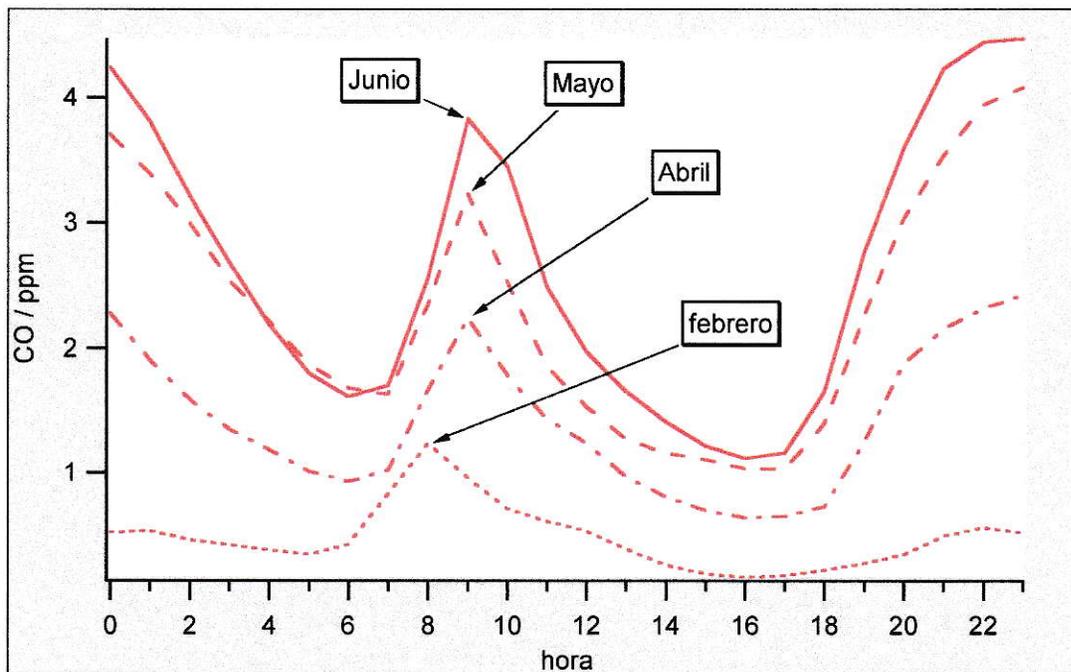


Figura N°24 Perfiles de ciclos diarios de CO para algunos meses del año 1998 en Santiago, el que se ha obtenido a partir de un corte en algunos meses de la imagen anterior (elaboración propia).

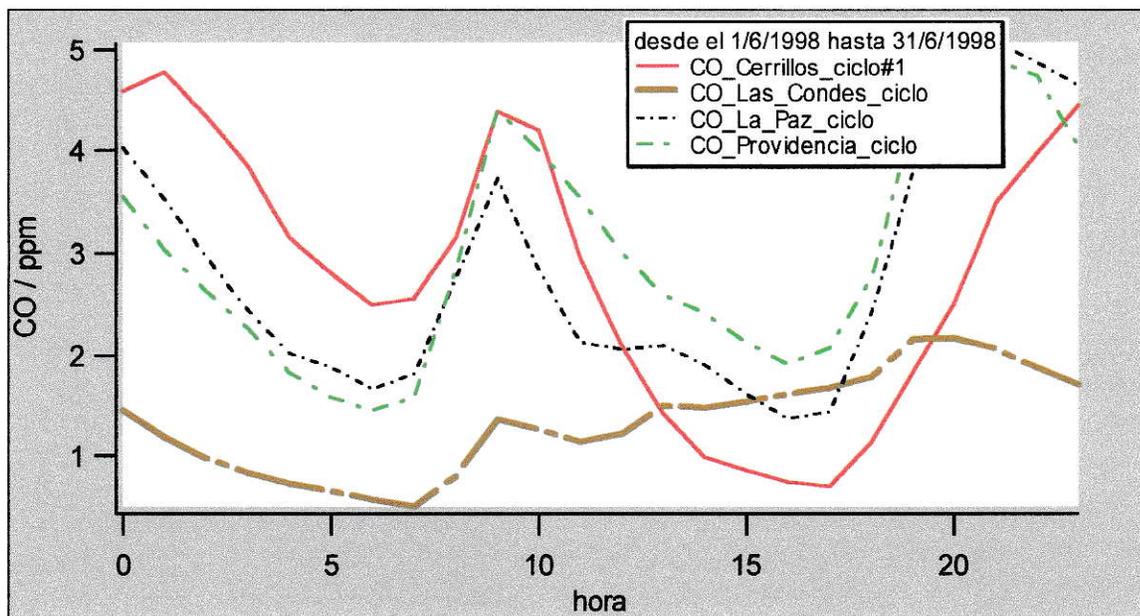


Figura N°25 Ciclos diarios promedio de CO desde 1/6/1998 hasta 31/6/1998 para las estaciones de Cerrillos, Las Condes, La Paz y Providencia (elaboración propia).

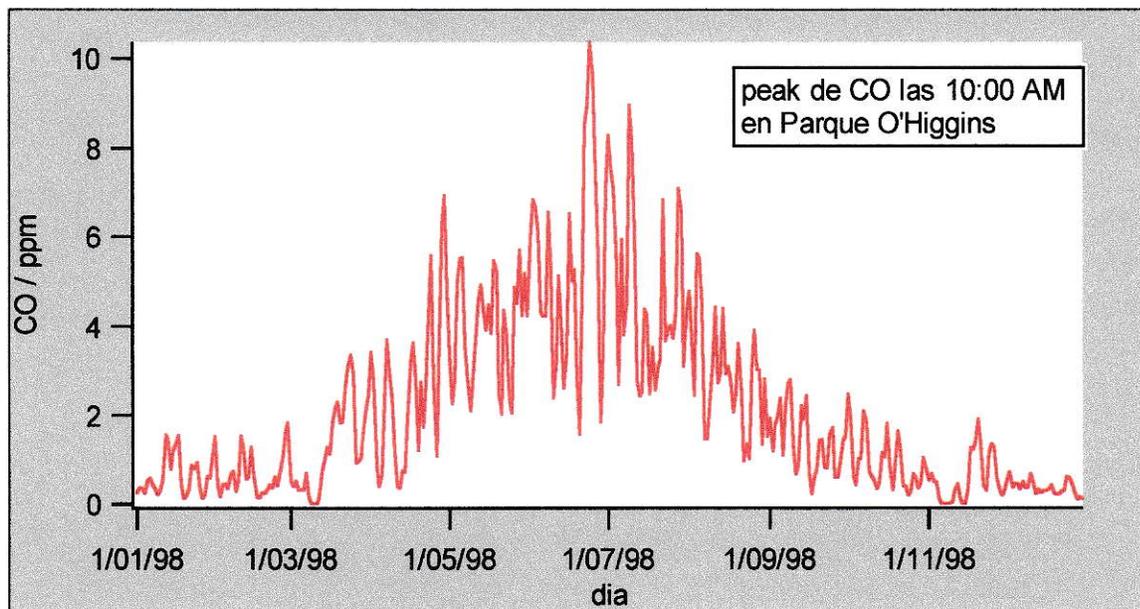


Figura N°26 Concentraciones de CO a las 10:00 hrs en la estación de Parque O'Higgins, que muestra la variabilidad principalmente sinóptica que afecta las concentraciones de CO (elaboración propia).

7.1.3 Ciclo diario promedio distribuido espacialmente

Observaciones de Abril a Agosto (año 1999), período en el que se miden las mayores concentraciones de CO, muestran que la distribución espacial sobre la ciudad, obedece, principalmente, a una interacción entre las emisiones y la ventilación sobre la cuenca (altura de capa de mezcla y viento).

Entre las 7:00 hrs. y 9:00 hrs., existe un aumento de las concentraciones de CO en las estaciones periféricas de la ciudad (**Figuras N° 27 y 28**); situación que se asocia al incremento del transporte de los ciudadanos hacia sus actividades diarias. Se observan altas concentraciones en el sector Oeste de la ciudad a las 7:00 hrs. y en la estación de La Florida se registran máximas concentraciones a las 9:00 hrs. (4 ppm promedio entre Abril y Agosto de 1999).

A partir de las 10:00 hrs. hasta las 12:00 hrs (**Figura N° 29**), se observan una disminución general de las concentraciones de CO, con los valores más altos en las estaciones céntricas como Parque O'Higgins, La Paz y Providencia. Situación atribuible al traslado de las emisiones al centro de la ciudad (*ver Figura N° 73*) y a un incremento del transporte de CO por la brisa de valle, el que mueve los contaminantes desde el sector Poniente al Oriente.

Desde las 14:00 hrs. hasta las 18:00 hrs., el viento transporta al CO, hacia el sector noreste de la ciudad (**Figura N° 30**), registrándose un incremento de las concentraciones desde centro de Santiago (Providencia) y hacia la estación de Las Condes.

A partir de las 19:00 hrs., la disminución de la altura de capa de mezcla, el cambio de dirección del viento (convergencia del viento en el centro de la ciudad entre las 20:00 hrs. y 22:00 hrs.) y el aumento de las emisiones, dan como resultado un incremento generalizado de las concentraciones de CO, sobre todo en las estaciones del Centro y Sur de la ciudad (**Figura N° 31**).

Desde las 23:00 hrs y durante toda la noche, existe un transporte de contaminantes, producido por la brisa montaña, desde las zonas altas de la ciudad como Las Condes y La Florida a zonas bajas de la ciudad como Pudahuel (**Figura N° 32**)

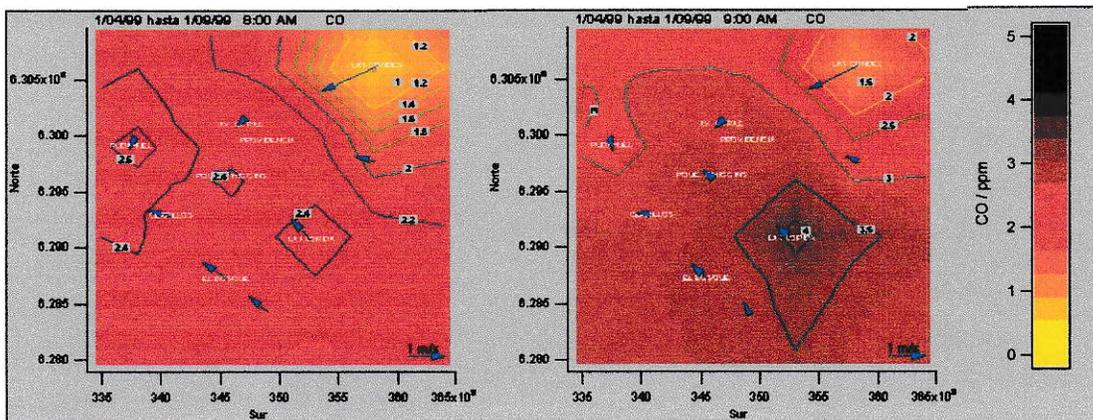


Figura N°27 y Figura N°28 Concentraciones de CO a las 8:00 hrs. y 9:00 hrs. del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1999 (elaboración propia).

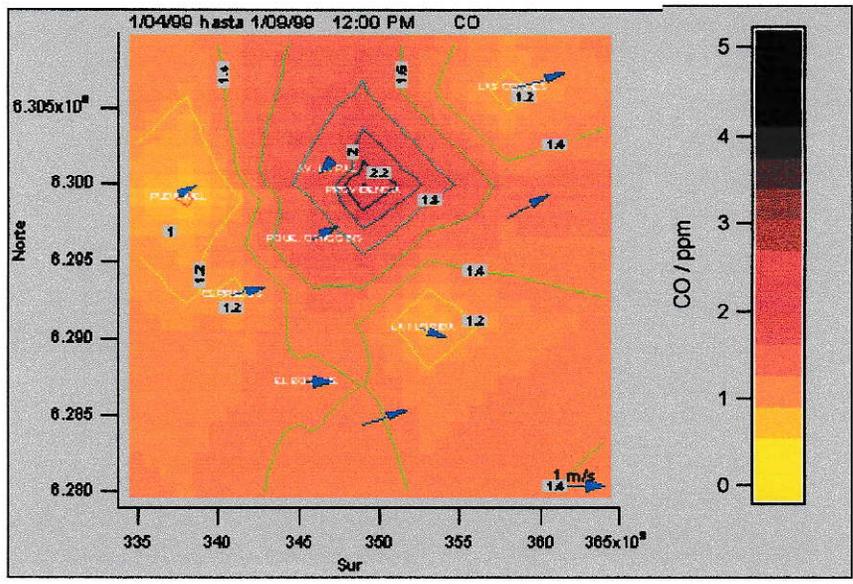


Figura N° 29
 Concentraciones de CO a las 12:00 hrs. del ciclo promedio diario entre los meses de Abril a Agosto de 1999 (elaboración propia).

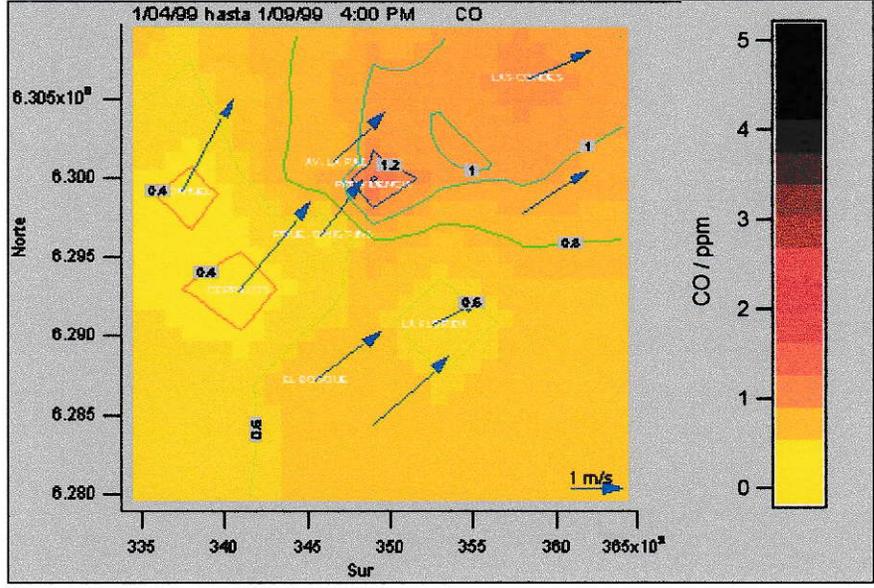


Figura N°30
 Concentraciones de CO a las 16:00 hrs del ciclo promedio diario entre los meses de Abril y Agosto de 1999. (elaboración propia).

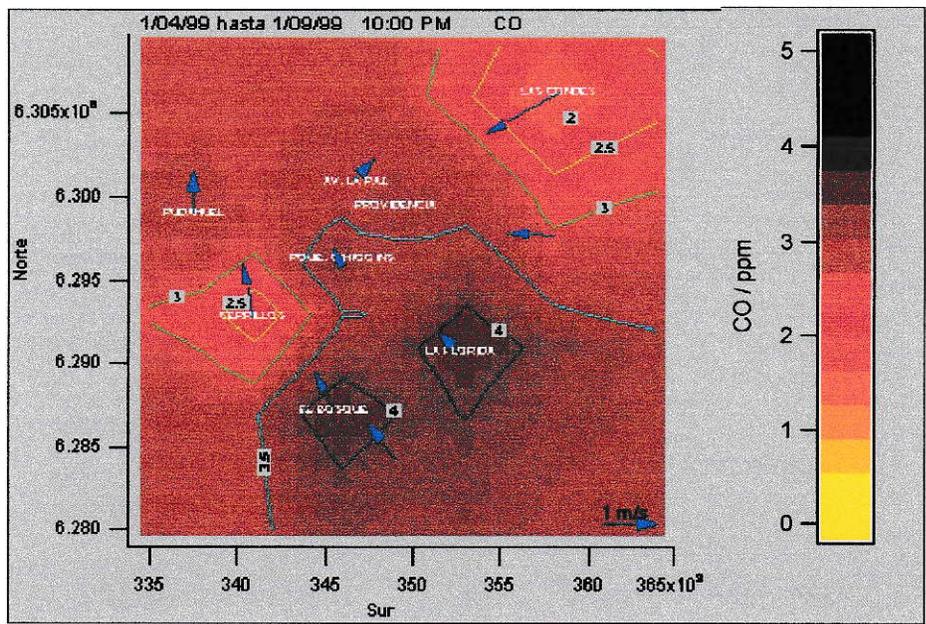


Figura N°31
 Concentraciones de CO a las 22:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1999 (elaboración propia).

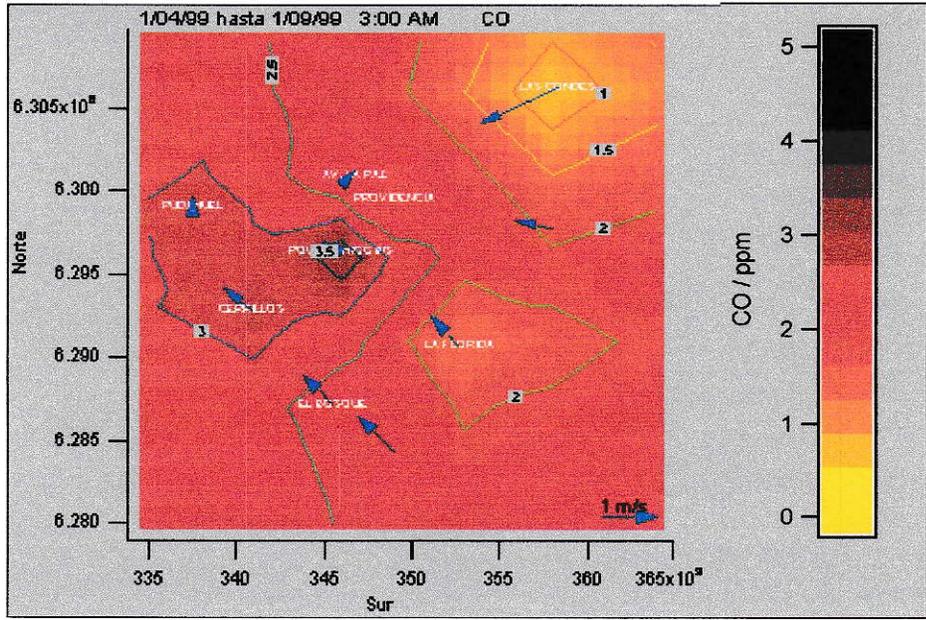


Figura N°32
 Concentraciones de CO a las 3:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1999. (elaboración propia).

7.1.4 Comparación interanual

Al comparar los tres años de mediciones de CO en la *Figura N° 33* (promedios de inviernos entre el 1997 y el 1999, para las ocho estaciones), se observa una disminución aproximada de un 35%, 21% y 32% de las concentraciones, a las 22:00 hrs., 9:00 hrs. y 14:00 hrs., respectivamente (*Figura N° 34*). Esta reducción se puede atribuir al cambio que ha sufrido el parque automotor, con mayor proporción de vehículos catalíticos.

Al analizar las tendencias horarias del CO, en el período de invierno, se observa una mayor disminución de las concentraciones en horas de la tarde y en las primeras horas de la noche. Una explicación a esta situación, teniendo en cuenta las formas de remoción del CO, es el probable aumento de oxidantes en la ciudad de Santiago, lo que provocaría en última instancia menores concentraciones de CO, cuando los niveles de oxidantes son mayores (durante la tarde y primeras horas de la noche). Sin embargo, esta hipótesis debe ser corroborada, ya que no se observa claramente esta tendencia en el verano.

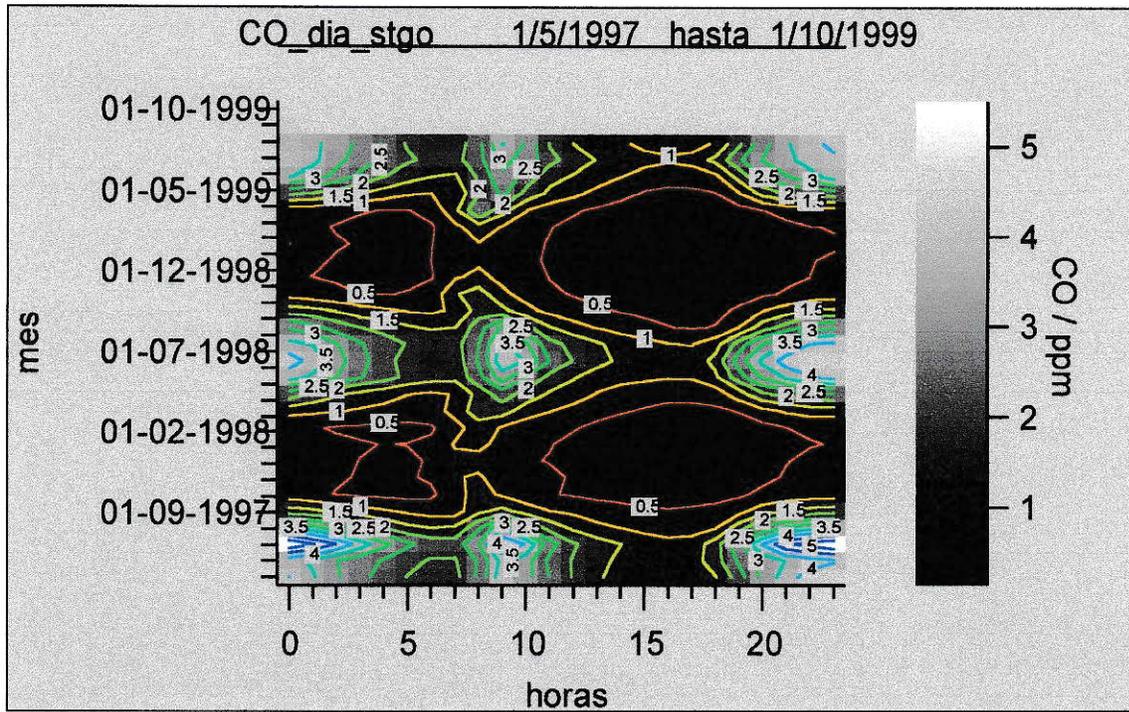


Figura N°33 Ciclos diarios promedio mensual entre Mayo de 1997 y Octubre de 1998 (elaboración propia)..

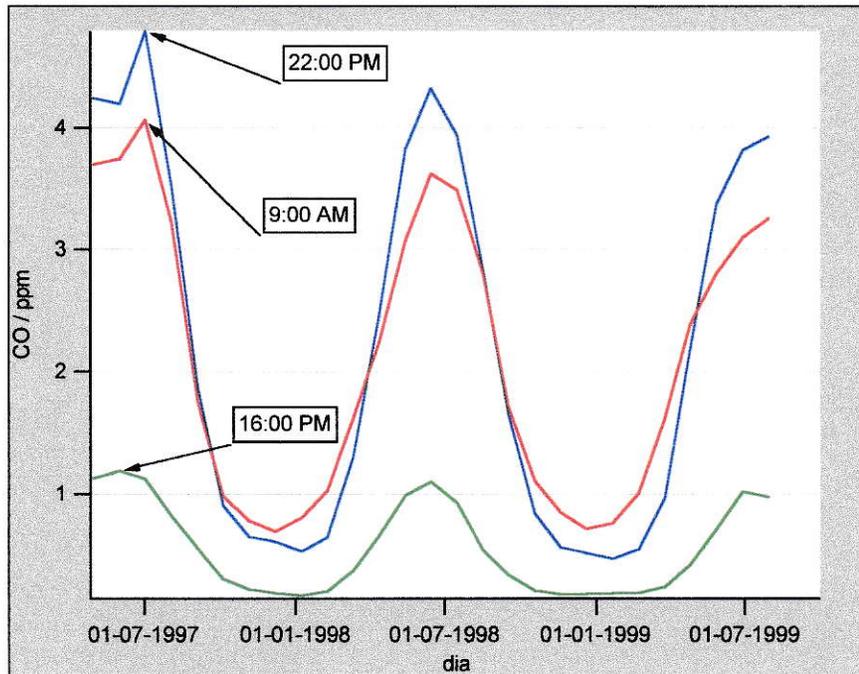


Figura N°34 Curvas obtenidas a partir de la interpolación de las concentraciones promedios mensuales para las 22:00 hrs., 9:00 hrs. y 16:00 hrs. entre Julio de 1997 y Julio de 1999 (elaboración propia).

7.2 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

7.2.1 Antecedentes generales

El dióxido de azufre es un contaminante predominantemente antropogénico, producido por la quema de combustibles fósiles que contienen azufre (*Tabla N° 8*), como carbón y petróleo y por las fundiciones de minerales azufrados (Cullis and Hirschler, 1980).

Tabla N°8 Emisiones globales estimadas de SO₂.

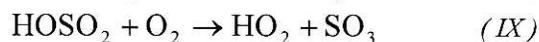
Fuente	SO ₂ M Ton (S)/año
Combustión de combustibles fósiles más industrias	70
Quema de biomasa	2.8
Volcanes	7-8
TOTAL	79.8-80.8

(Fuente Berresheim et al. 1995)

Otras fuentes de SO₂, son las reacciones en la estratósfera de sulfuro de carbonilo (OCS) producido en el mar, con el radical O[•] o su fotólisis (Berresheim et al, 1995), el que posteriormente desciende a la tropósfera. Otras, son la oxidación del dimetilsulfuro (DMS), H₂S y CS₂, por el radical HO[•], en la tropósfera (Charson et al, 1987).

Los principales sumideros del SO₂ en la tropósfera, se ordenan de acuerdo a su importancia: reacción en fase homogénea, en fase heterogénea (que generarán principalmente ácido sulfúrico y sulfatos) (Moller, 1980) y deposición seca.

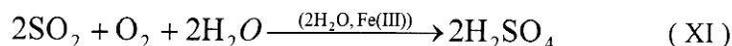
Las reacciones en fase homogénea constituyen en su conjunto una remoción de un 4% del SO₂ por hora, realizadas por los radicales OH[•], HO₂[•] y CH₃OO[•], en magnitudes similares (Calvert et al., 1978, Kan et al., 1979).



En presencia de suficiente óxido nítrico, el HO₂ regenera al radical OH, oxidando a NO₂.

Experiencias en cámaras de simulación, han mostrado que al agregar SO₂ en presencia de CH₄ y HC, no cambia en forma significativa los niveles de olefinas ni de O₃ que se alcanzan (Smith y Urone, 1974). Sin embargo, existe un aumento en la producción de aerosoles secundarios y en la formación de una serie de compuestos de azufre (Calvert y McQuigg, 1975; Schroeder y Urone, 1978).

Las reacciones en fase heterogénea ocurren en la superficie de los aerosoles, a bajas temperaturas y humedad relativa alta (Kadowaki, 1986). Allí reaccionan con el oxígeno atmosférico para formar SO₃ (altamente higroscópico), en presencia de catalizadores (principalmente sales de Fe (III)) (Schlesinger et al 1980), generando una niebla de pequeñas gotitas de ácido sulfúrico, las que aumentan de tamaño al chocar con otras gotitas. Sin embargo, estas reacciones conducen casi exclusivamente a la formación de ácido sulfúrico o sulfato que permanece absorbido en las partículas.



El SO₂ sobre la superficie marina, tiene un rango de concentración que va desde los 20 ppt a más de 1 ppb, en la tropósfera libre (sobre los 5 km.) alcanza concentraciones de 50 ppt, en cambio en atmósferas contaminadas sus concentraciones promedios son superiores a 2 ppb (Seinfeld, 1997).

La concentración promedio para los tres años de monitoreo la red MACAM 2 medida en la estación de P O'Higgins entre 1 de Abril de 1997 al 1 de Julio de 1999 es de 6 ± 8 ppb de SO₂ (elaboración propia).

Estudios de concentración de azufre en material particulado fino, muestran concentraciones similares en toda la ciudad de Santiago, incluso en zonas remotas como Talagante y Peldehue (Artaxo, 1998).

Según el resultado obtenido por el inventario de emisiones (*Tabla N° 9*) para la ciudad de Santiago (1997), dentro de las fuentes fijas, las que más contribuyen son las calderas (8735 Ton*año⁻¹) y los procesos industriales (7827 Ton de SO₂*año⁻¹). Para las fuentes móviles, las más importantes son los vehículos diesel (camiones con 1348 Ton*año⁻¹ y buses con 1010 Ton*año⁻¹) (CONAMA, 1998).

Tabla N° 9 Emisiones de SO₂ estimada a partir del inventario de emisiones de Santiago del año 1997

Actividades y fuentes relacionadas con	SO ₂ Ton / año
Transporte	3157
Industria, comercio, construcción	17038
Agricultura	0
Domésticas	975
Polvo resuspendido	0
TOTAL	21170

Fuente: CONAMA-RM, 1998

La distribución de las emisiones de SO₂ en Santiago se puede observar en la *Figura N° 74*. De ella se concluye que las principales emisiones (mayores a 2 y 5 g /s/ km²) dentro de la ciudad de Santiago, son fuentes puntuales dispersadas. En cambio las fuentes menores a 2 g/s/km², tienen altas emisiones en el centro y declinan hacia la periferia.

El principal aporte de SO₂ hacia Santiago, lo constituyen las fundiciones de minerales con alto contenido en azufre, ubicadas fuera de la Región Metropolitana (Gallardo et al, 2000). Situación que se corrobora al compararlo con el comportamiento de las concentraciones de As (Artaxo, 1998).

7.2.2 Episodios de SO₂

Las mediciones de SO₂ en Santiago, muestran la ocurrencia de máximos en algunos días, que tienen carácter episódico (eventos no regulares). Situación que se observa en la *Figura N°35*.

Los episodios de SO₂ observado en Santiago, se caracterizan por:

- producir máximos de concentraciones superiores a 30 ppb en todas las estaciones de la red.

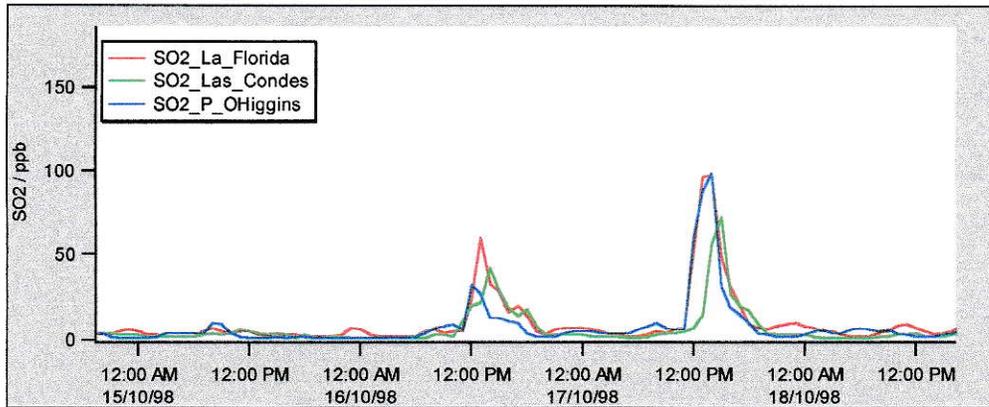


Figura N°35 Concentraciones de SO₂ desde el 15 al 18 de Octubre de 1998, en las estaciones de La Florida Las Condes y Parque O'Higgins. Se observan dos episodios de SO₂ en las tardes del 16 y 17 Octubre (elaboración propia).

Generalmente en invierno, a la mañana siguiente del episodio, existe un pequeño aumento de las concentraciones de SO₂ en las estaciones del centro de Santiago.

Durante el año 1998 se registraron 67 episodios de SO₂. Éstos podrían estar asociados a las emisiones de SO₂, transportadas desde la fundición de cobre de Caletones, ubicada en los 34°05'S, 70°27'W, a 2.400 m.s.n.m., en la cordillera de la VI Región. Si bien las concentraciones alcanzadas no superan la norma, las masas de SO₂ que están entrando a la cuenca son significativas, debido al gran volumen de mezcla y mayor ventilación existente a esas horas. En invierno este fenómeno generalmente está asociado a un incremento de los vientos nocturnos del Este, como los observados en la configuración tipo A, los que transportan contaminantes desde los sectores cordilleranos, como la fundición de Cobre de Caletones, hacia los valles de la zona Central.

El mecanismo propuesto, a partir de las observaciones meteorológicas y químicas de la red, por el cual se incorpora esporádicamente el SO₂ a Santiago, es el siguiente:

- Entre quince a diez horas antes de ocurrir el máximo de SO₂, se registran vientos en altura con dirección S-E (sobre los 800 m.s.n.s.) y con velocidades aproximadas de 3 m/s; ésto provoca que el penacho de la fundición de cobre de Caletones pase sobre la cuenca de Santiago.
- Posteriormente, la mayor altura de capa de mezcla sobre Santiago (entre las 12:00 hrs. y las 18:00 hrs.), es la responsable de incorporar el SO₂ desde las capas altas de la tropósfera baja (800 m.s.n.s, aproximadamente) hacia la superficie.
- Por último, la brisa de valle, se encarga de transportar el SO₂ desde las estaciones del S-W hacia el N-E de la ciudad, registrándose concentraciones superiores a los 30 ppb (**Figura N° 36**).

A la mañana siguiente de ocurrido el episodio, generalmente se observa un aumento de la concentración, desde las 9:00 hrs. hasta las 11:00 hrs., en un rango entre los 5 y 11 ppb promedio horario de SO₂, dependiendo de la estación. Situación asociada a un mezclado del SO₂ de la capa residual nocturna, existente del día anterior.

7.2.3 Ciclos diarios promedio

Los ciclos diarios promedio mensual, están fuertemente influenciados por la ocurrencia de episodios (*Figura N° 37*).

Por este motivo, al analizar los promedios mensuales de ciclos diarios de SO₂, se observa una cierta aleatoriedad en la conducta temporal de las concentraciones, situación que es asociada al comportamiento esporádico del episodio. No obstante, se pueden distinguir algunas conductas interesantes de analizar como:

- La hora en que ocurre el episodio va a depender de la época del año: En verano tiende a ser cercano a las 14 hrs. y en invierno hacia las 17:00 hrs..
- A la mañana siguiente del episodio, generalmente se observa un aumento de las concentraciones de SO₂, especialmente para el período invernal; lo que genera un aumento de los ciclos diario promedio de SO₂, durante la mañana.

También se observa hasta mediados del año 1998, aumentos nocturnos de las concentraciones en las estaciones del sector Sur de Santiago (La Florida y El Bosque), los que están asociados a vientos superficiales del S y SE. Este comportamiento puede atribuirse a emisiones locales en el sector Sur, dado que las condiciones de dispersión durante la noche limitan la influencia de fuentes alejadas.

7.2.4 Distribución espacial

Las primeras estaciones en registrar el aumento de SO₂, son las del sector Sur de la ciudad (El Bosque, La Florida y Cerrillos), como se muestra en la *Figura N°38*. Una vez ingresado el SO₂, es transportado por el viento hacia el N E con dirección Las Condes durante aproximadamente tres horas. En la hora en que ocurre el episodio de SO₂, los vientos (bajo los 500 m sobre el suelo) están influenciados por la brisa de valle, lo que causa características similares en el desplazamiento e incorporación del SO₂, para diferentes episodios.

Generalmente al día siguiente de ocurrido el episodio de SO₂ (*Figura N°39*), se observa un aumento de la concentración de SO₂, en la zona centro de Santiago (estaciones de La Paz, La Florida y Parque O'Higgins). Esta situación podría estar asociada a la recirculación del SO₂ que fue acumulado el día anterior, en la zona de la atmósfera que se encuentra por sobre la inversión térmica nocturna.

Al desplazarse el SO₂ por Santiago, se observa una mayor dilución de lo experimentado por el CO. Esta situación podría estar asociada a una mayor reacción de SO₂ con los gases oxidantes presentes en Santiago, o bien, la hora en que ocurre el episodio SO₂, existe una mayor ventilación, lo que provoca una disminución de las concentraciones.

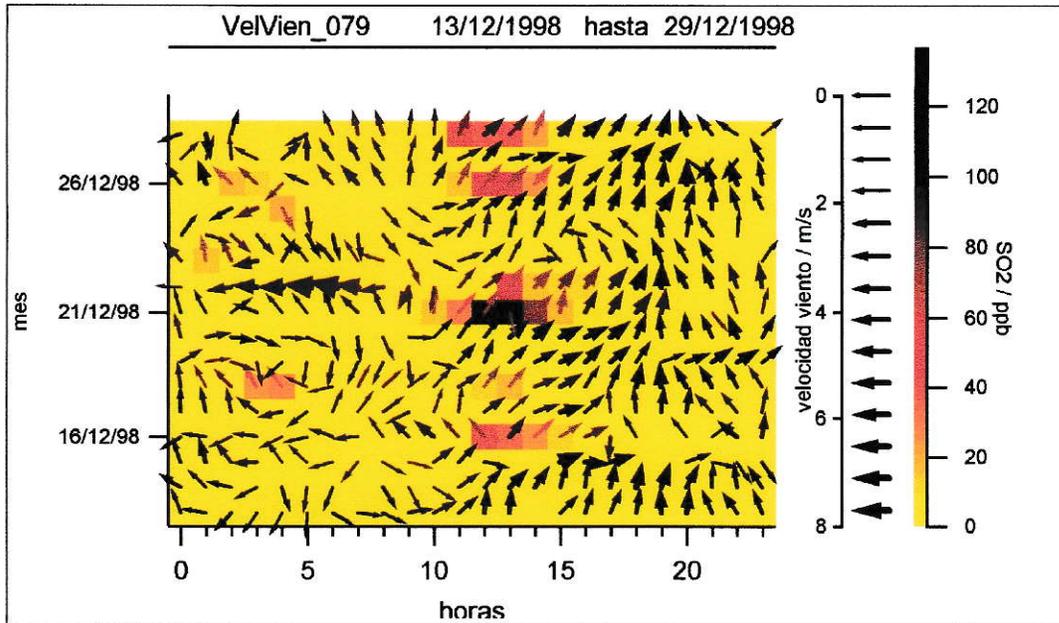


Figura N° 36 Recreación de cuatro de SO_2 medidos en la estación del Bosque (color oscuro) durante diciembre de 1998, que están relacionados con el viento SE medido a 800 m sobre el suelo (flechas), horas previas al episodio (elaboración propia).

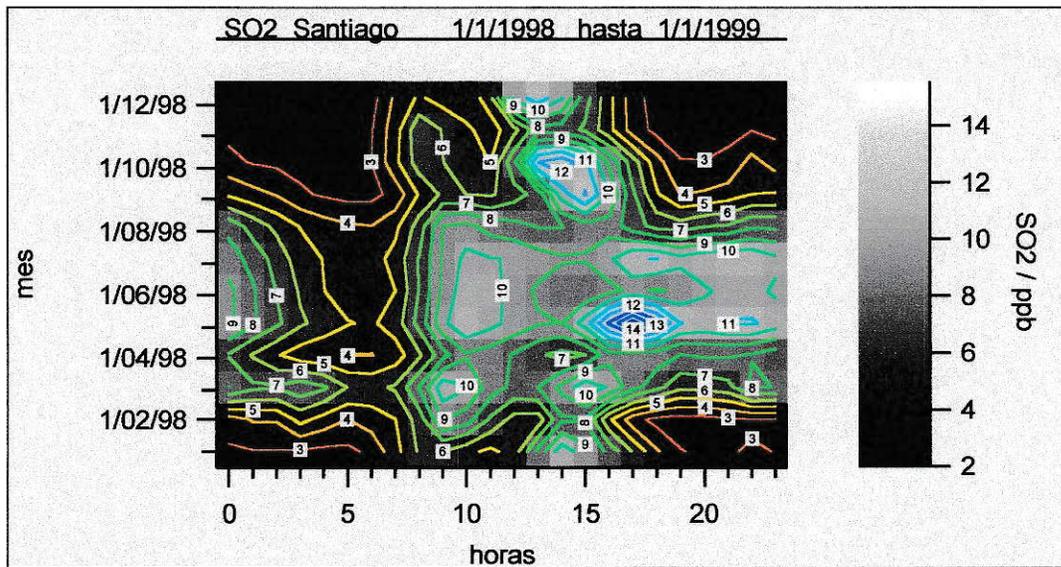


Figura N°37 Ciclos diarios promedio mensual de SO_2 para el año 1998 donde se muestra la aleatoriedad de las concentraciones de SO_2 (elaboración propia).

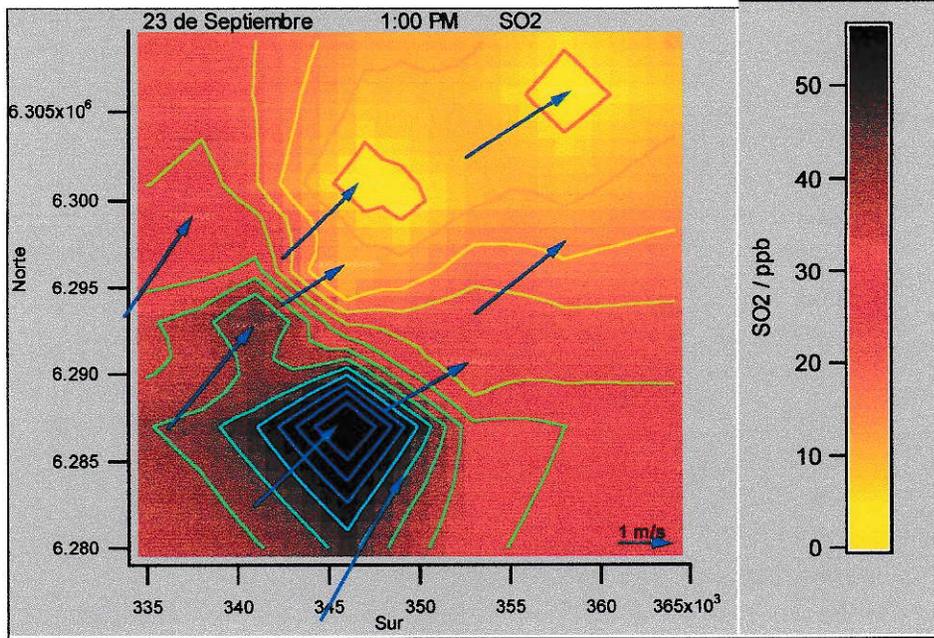


Figura N°38 Distribución espacial de las concentraciones de SO₂, para el episodio del 23 de Septiembre a la 13:00 hrs. (elaboración propia).

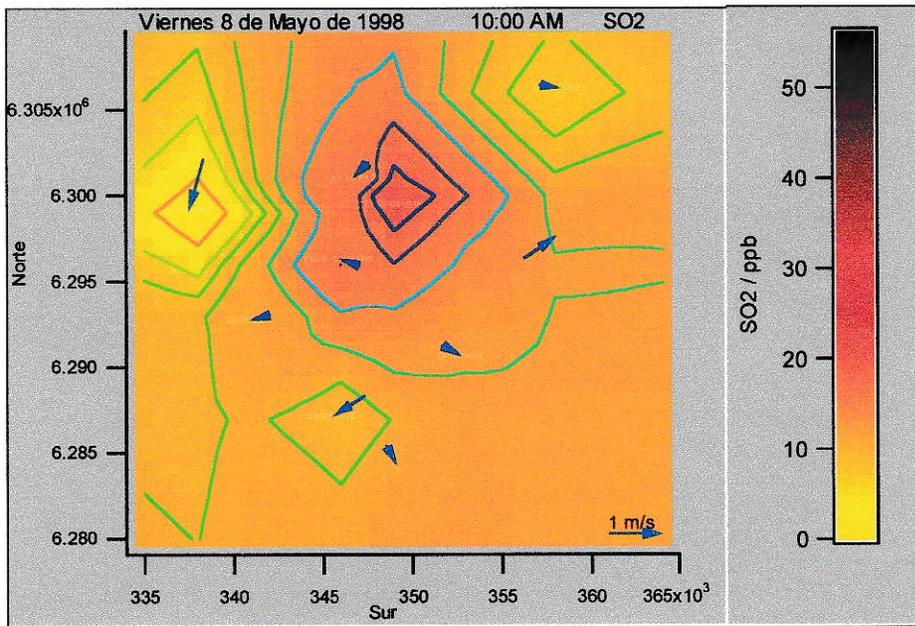


Figura N° 39 Distribución espacial de concentraciones de SO₂ para las 10:00 hrs del viernes 8 de Mayo. Día siguiente a un episodio de SO₂ (elaboración propia).

7.3 ÓXIDOS DE NITRÓGENO ($\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$)

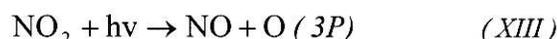
7.3.1 Antecedentes generales

El óxido nítrico (NO), muy importante en la formación de smog fotoquímico, es generado a la troposfera en un 46% (IPCC 1995) por procesos de combustión que logran oxidar al nitrógeno molecular (N_2). El N_2 es abundante (78.1% de la mezcla seca de gases atmosféricos), pero extremadamente estable (*Tabla N° 10*).



Debido a la gran cantidad de energía requerida (reacción endotérmica), esta reacción es sólo posible en procesos de combustión a altas temperaturas (combustión interna mayoritariamente o quema de biomasa) o relámpagos.

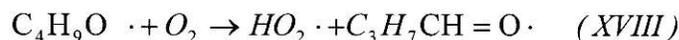
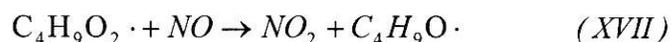
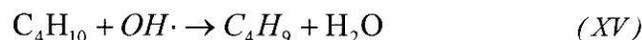
Otras fuentes de NO, lo constituyen la oxidación de amoníaco (NH_3) por OH^\cdot y la fotólisis del NO_2 (<424 nm), único compuesto fotosensible del smog.



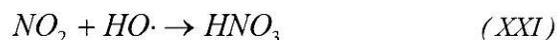
El átomo de oxígeno ($\text{O}(3P)$), reacciona principalmente con la molécula de oxígeno generando O_3 (también reacciona con el agua para formar radicales OH^\cdot), por lo que el nivel de O_3 queda en gran manera determinado por la relación de las concentraciones de NO_2 y NO.

$$\text{O}_3 \approx k \frac{\text{NO}_2}{\text{NO}} \quad (\text{XIV})$$

Dónde $k = 0.021$ para $Z = 40^\circ$ (Sanhueza y Lissi, 1981). Sin embargo, la reacción XIII muestra que no es posible el aumento simultáneo de NO_2 y O_3 , debido a que la generación de uno implica la destrucción del otro, por lo que se requieren reacciones paralelas con CO o HC que permiten generar NO_2 a partir de NO. Este último tipo de mecanismo, fue propuesto simultáneamente por Heicklen y colaboradores (1971) y por Weinstock y colaboradores (1971). Por ejemplo, con el butano:

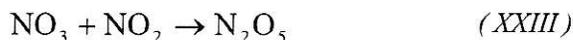
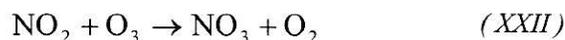


La remoción de los compuestos nitrogenados se lleva a cabo principalmente por el radical OH^\cdot , que reacciona con el NO_2 transformándolo a ácido nítrico (HNO_3) ($1.1 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ molecula}^{-1} \text{ s}^{-1}$ a 300 K) (Atkinson R y Lloyd AC, 1983).



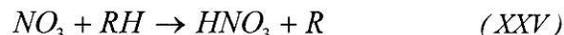
También el HNO_3 puede ser formado lentamente ($1.3 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecula}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; Tuazon EC et al., 1983), dentro del aerosol líquido (fase heterogénea), mediante la hidrólisis de N_2O_5 ,

cuando las concentraciones de NO son bajas, reacción típicamente nocturna (Jones Cl, Seinfeld JH , 1983 y Russell AG, McRae GJ, Cass GR, 1985).



O bien, el N_2O_5 puede reaccionar con NaCl sobre las partículas de aerosol para formar directamente la sal de nitrato de sodio (NaNO_3)

Otra reacción alternativa a la anterior es la reacción con un radical (RH)



Los NO_x (suma de NO y NO_2) en atmósferas contaminadas generan un gran número de compuestos orgánicos nitrogenados, como el peroxiacetil nitrato (PAN), causantes en gran porcentaje, entre otras cosas, de la irritación ocular observada en ciudades como Santiago (CORFO, 1978).

Tabla N° 10 Emisiones globales estimadas de NO_x

Fuente	NO_x M Ton (N)/año
Combustión de combustibles Fósiles	24
Descarga del suelo	12
Quema de biomasa	8
Rayos	5
Oxidación de NH_3	3
Aviones	0.5
Transporte estratosférico	0.1
TOTAL	52.6

Fuente: IPCC 1995

Según el inventario de emisiones de Santiago (del año 1997), las principales fuentes de emisión de NO_x lo constituyen el transporte con un 70,6% (vehículos particulares 13575 Ton*año⁻¹, camiones 8727 ton/año, Buses 5490 Ton*año⁻¹), industria, comercio y construcción con un 25% (Procesos industriales 5391 Ton*año⁻¹ y calderas industriales 5075 Ton*año⁻¹) y domésticas (3.6%). Debido a esto, existe una gran similitud entre la distribución espacial de emisiones de NO_x y CO, alta en el centro y que disminuye hacia la periferia de la ciudad de Santiago (Figura N° 75).

Tabla N° 11 Estimación de emisiones de NO_x por el inventario de emisiones para la ciudad de Santiago durante el año 1997

Actividades y fuentes relacionadas con	NO_x Ton/ año
Transporte	30943
Industria, comercio, construcción	10959
Agricultura	359
Domésticas	1567
Polvo resuspendido	0
TOTAL	43828

Fuente: CONAMA-RM 1998

7.3.2 Ciclos diarios promedio

El comportamiento diario del NO, muestra dos máximos o incrementos de concentración: Uno en la mañana y el otro en la noche, producto de las interacciones entre las emisiones y ventilación de la cuenca.

Las tendencias anuales muestran las máximas concentraciones de NO en invierno, en cambio las mínimas ocurren en verano. Esto hace suponer que el principal factor que modela la concentración anual de NO, es el grado de ventilación de la cuenca (factor de ventilación). Se observa una gran similitud entre el comportamiento del CO y el NO.

Las máximas de NO, ocurren en las noches de los meses de invierno (entre las 23:00 hrs. y 24:00 hrs.), calculándose concentraciones promedio mensual en las ocho estaciones superiores a 200 ppb (Junio de 1998 a las 22:00 hrs.).

En verano se miden bajas concentraciones de NO (*Figura N° 40*), situación que puede ser atribuida a una mayor ventilación, volumen de mezcla y remoción química. Los mínimos de concentración de NO ocurren en las tardes y horas previas al amanecer, especialmente las de verano, donde la remoción mecánica y química son mayores.

Las máximas concentraciones nocturnas de NO, sólo son apreciables desde Marzo en adelante, en cambio, las máximas de la mañana son registradas durante todo el año.

De especial interés es el comportamiento en la estación Las Condes, a diferencia de lo que ocurría con el CO, se observan dos máximos de concentración de NO (uno en la mañana y otro en la noche). Esto es explicable principalmente por el efecto que tiene el O₃ y algunos hidrocarburos al oxidar el NO a NO₂, disminuyendo las concentraciones durante la tarde y que se confirma con las mayores concentraciones de NO₂ observadas a esas horas en esta estación.

A diferencia del resto de las estaciones, las máximas concentraciones de NO en Las Condes son registradas en el mes de Julio y no en Junio.

Para el NO₂, la máxima concentración ocurre después de tres a cuatro horas del máximo diurno de NO, situación atribuible principalmente a su origen secundario (*Figura N° 41*). Tanto para las estaciones del centro y Oriente de la ciudad, se observan altas concentraciones durante las horas de la tarde.

Tanto para el NO como para el NO₂ se observa una variación de las concentraciones entre invierno y verano, sin embargo esta es mayor para el caso del NO₂. Esta situación revela la importancia que tiene la radiación solar sobre la formación y destrucción de NO₂.

Las concentraciones nocturnas, si bien no son significativas al compararlas con el máximo de la mañana, se mantienen altas durante todo el año, debido a la menor ventilación que existe y la mayor oxidación de NO a NO₂, provocada por oxidantes como el O₃ y algunos HC.

La relación NO₂/NO (*Figura N° 42*), nos da una idea de la cantidad de oxidantes y en especial de O₃, que existe en la atmósfera. Por este motivo, la gran similitud que se observa entre este gráfico y las concentraciones de O₃. Sin embargo, existe una relación alta de NO₂/NO en las madrugadas, cuando la oxidación producida por el O₃ no es relevante y que puede ser explicada principalmente por la oxidación del NO a NO₂ producida por hidrocarburos y radicales o bien un aumento del HO₂, el que se incrementa con la oxidación de SO₂.

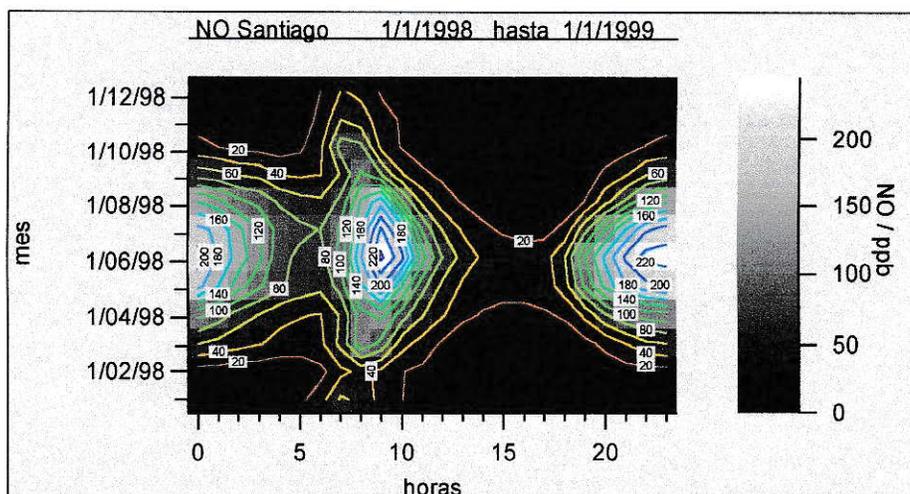


Figura N° 40 Ciclos diarios y ciclo anual promedio de las ocho estaciones de la red para NO para el año 1998, donde se muestra el comportamiento diario y anual del NO (elaboración propia).

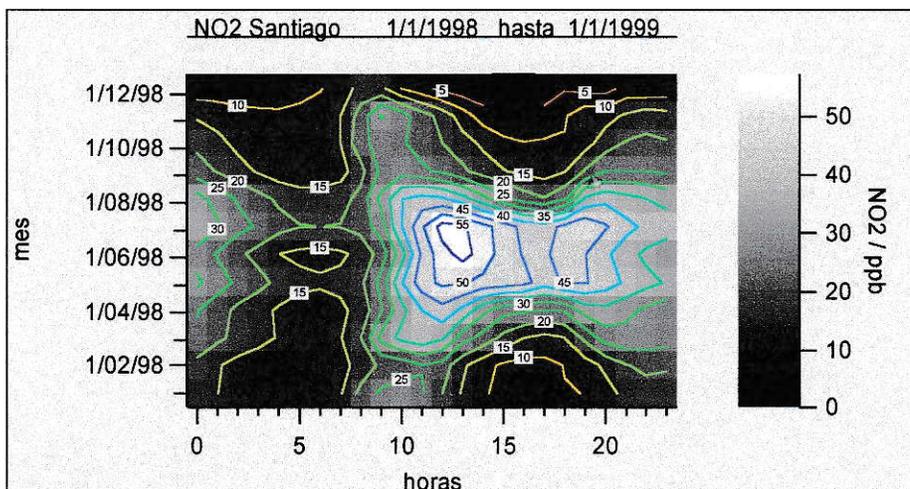


Figura N° 41 Ciclos diarios y ciclo anual promedio de las ocho estaciones de la red de NO₂ durante el año 1998, donde se muestra el comportamiento diario y anual (elaboración propia).

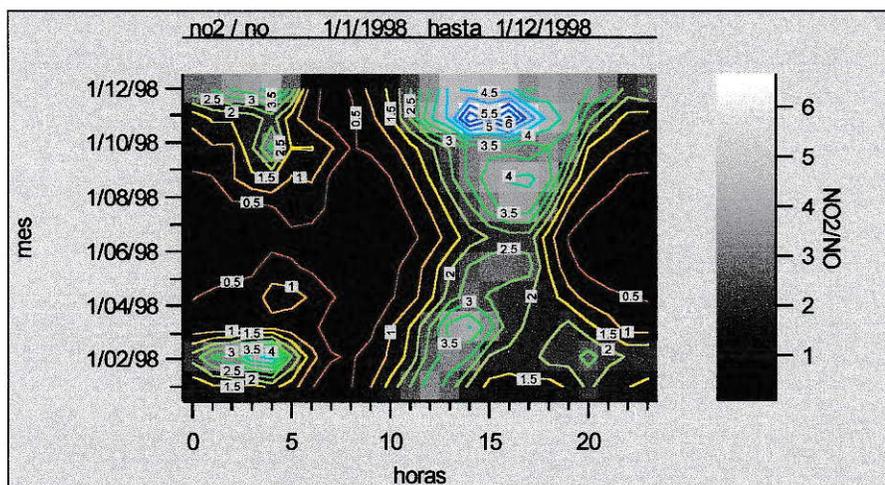


Figura N° 42 Ciclos diarios y ciclo anual promedio de las ocho estaciones de la red de NO₂/NO para el año 1998, donde se muestra el comportamiento diario y anual de la relación (elaboración propia).

7.3.3 Distribución espacial

El comportamiento espacial del NO, debiera ser similar al observado para el CO. Ésto se debe a que tanto las condiciones de ventilación como fuentes que los emiten son parecidas. Sin embargo, la mayor reactividad del NO con los oxidantes y el efecto de las fuentes fijas (son responsables de un 25% del total de las emisiones de NO_x), provocan, a ciertas horas del día, una diferencia sustancial en la distribución espacial del NO frente al CO.

De lo anteriormente descrito, se observa durante el día menores concentraciones de NO (al compararlas con el CO) en las estaciones ubicadas en la periferia de la ciudad (principalmente en La Florida y Las Condes). Esta situación, puede ser explicada por una mayor remoción química que provocan algunos oxidantes, como el O₃ e hidrocarburos, sobre el NO.

A las 9:00 hrs (máximo de la mañana), en la *Figura N° 43* se observan altas concentraciones de NO en el centro y Sur Poniente de la ciudad, situación que difiere de lo observado para el CO. Una probable explicación a esta diferencia, es el mayor porcentaje de emisión de NO_x, que tienen las fuentes fijas de combustión externa, como calderas, hornos, (incluyendo las emisiones generadas por la central termoeléctrica de Renca).

Durante el día (*Figura N° 44*), los valores disminuyen, con concentraciones de NO más altas en el centro de la ciudad y bajas hacia la periferia, lo que es atribuido a una mayor tasa de emisión y remoción, respectivamente, esta última causada por oxidantes (O₃, CH₃OO·, entre otros) presentes en la atmósfera de Santiago. De no ocurrir esta remoción química, hubiéramos observado el transporte del NO hacia el sector Oriente de Santiago, provocado por la brisa de valle.

Entre las 21:00 hrs y las 23:00 hrs (*Figura N° 45*) se observa un aumento nocturno de las concentraciones de NO, en el centro de la ciudad, lo que podría mostrar indirectamente los mayores niveles de oxidantes nocturnos, que existen en la periferia de Santiago. El máximo nocturno (0:00 hrs), muestra sus máximas concentraciones en el centro y SW de Santiago (estaciones de Parque O'Higgins, Cerrillos, Providencia y la Paz), causado, en parte, por la brisa de montaña.

En cuanto al comportamiento del NO₂, el máximo máximo se observa durante el medio día en el centro y Sur de la ciudad (estación Parque O'Higgins principalmente). Producto de la brisa de valle y la oxidación del NO a NO₂, se miden altas concentraciones desde el centro y hacia el sector NEe de la ciudad hasta 19:00 hrs.

Las concentraciones nocturnas de NO y especialmente NO₂ en el sector Poniente (Cerrillos y Pudahuel) son bajas, si pensamos en el transporte provocado por brisa montaña hacia estos sectores y a la menor altura de capa de mezcla. Una posible explicación sería la remoción en fase heterogénea, principalmente en forma de Nitrato, que se estaría produciendo en esta zona y que estaría favorecida por la alta concentración de material particulado y humedad (se discutirá en el Capítulo de PM10).

Debido a la ausencia de datos para el año 1999 de NO y NO₂, resulta imposible poder describir adecuadamente el comportamiento de estos contaminantes para todo el período analizado en este trabajo (1997-1999). Esta situación es lamentable, ya que cualquier conclusión o análisis temporal que se quiera hacer del O₃, pasa necesariamente por una comprensión del comportamiento del NO y NO₂.

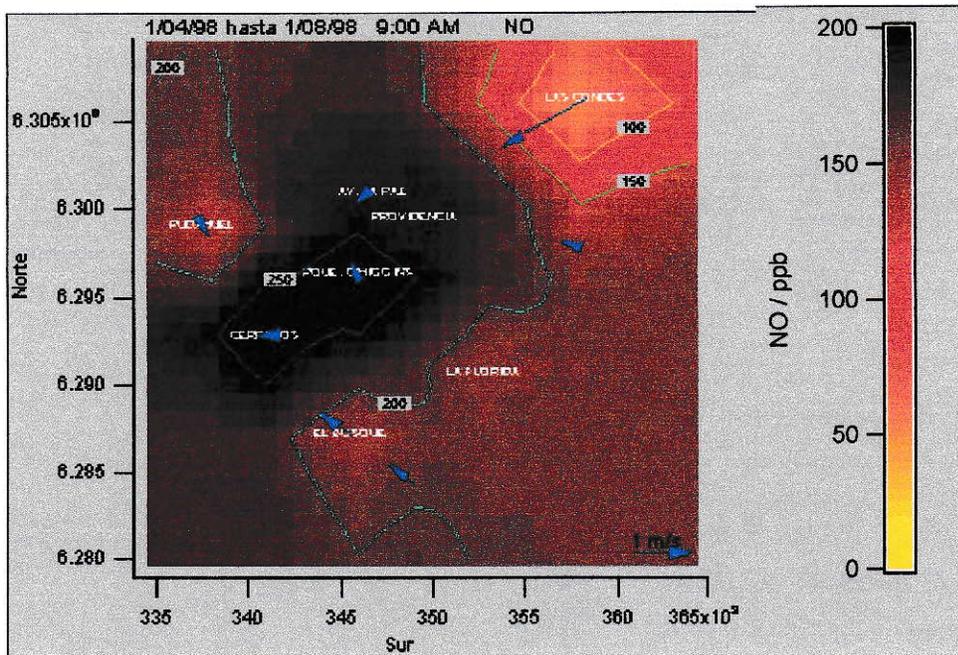


Figura N°43 NO a las 9:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1998 (elaboración propia).

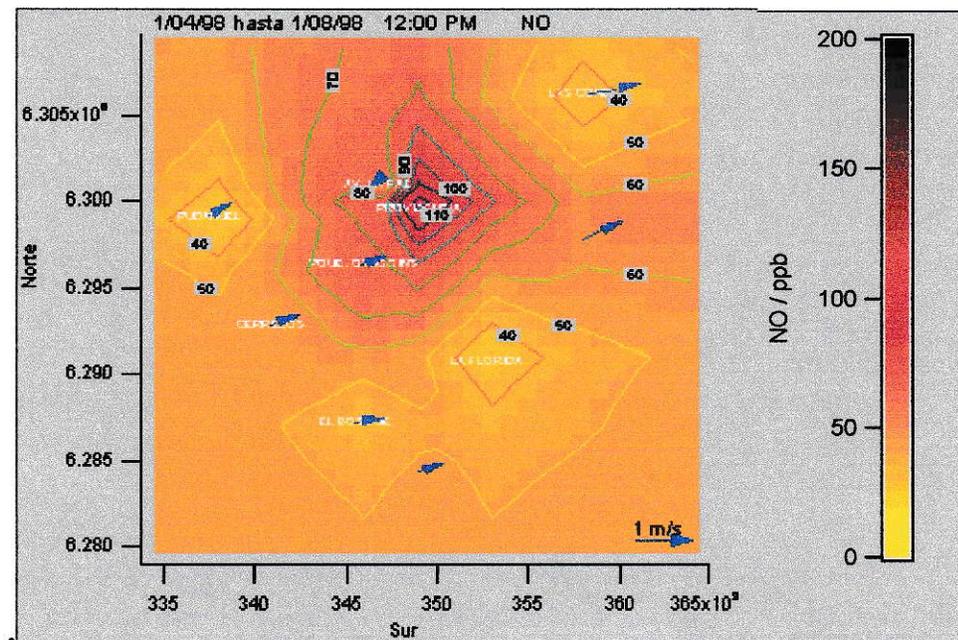


Figura N°44 NO a las 12:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1998 (elaboración propia).

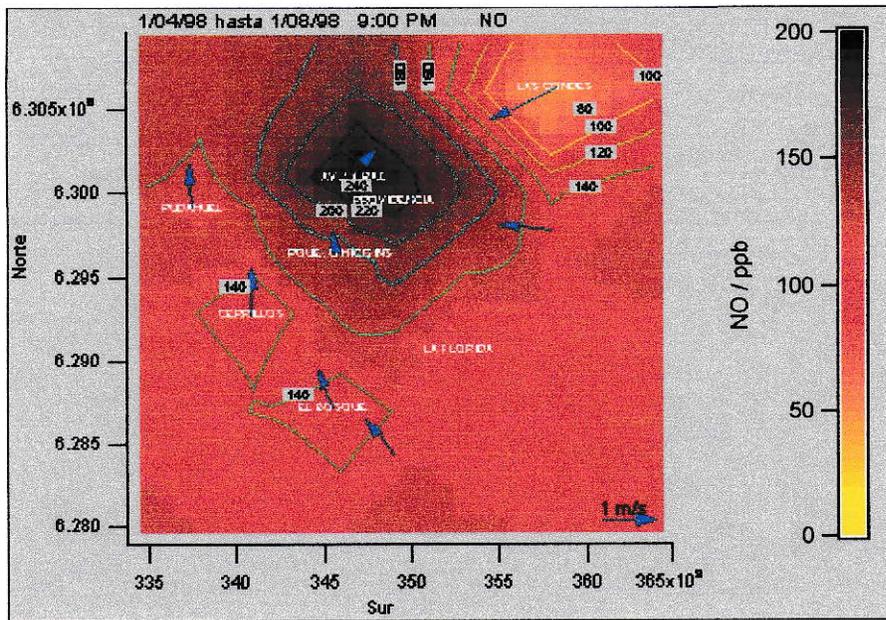


Figura N°45 NO a las 24:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1998 (elaboración propia).

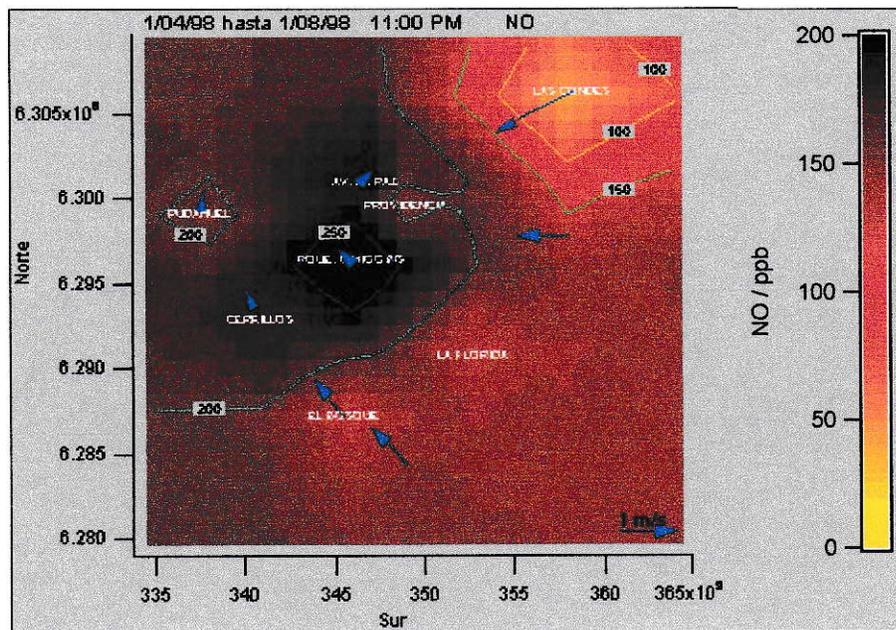


Figura N° 46 NO a las 24:00 hrs del ciclo promedio diario entre Abril y Agosto de 1998 (elaboración propia).

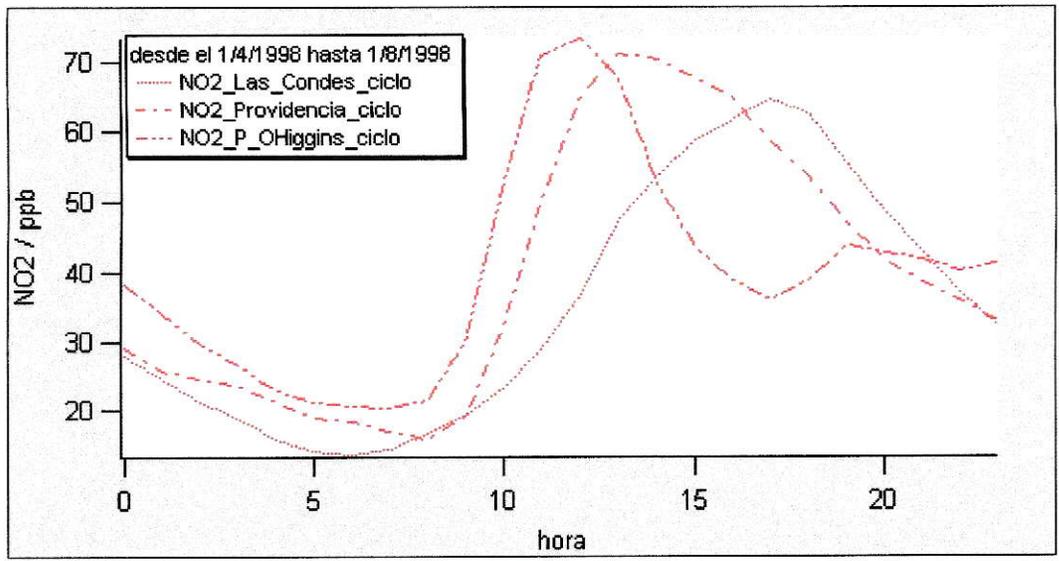
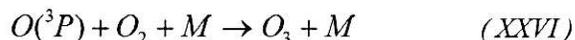


Figura N°47 Ciclos diarios de NO₂ en las estaciones de Las Condes, Providencia y Parque O'Higgins entre el Abril y Agosto de 1998 (elaboración propia).

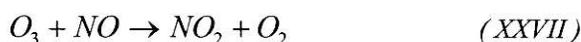
7.4 OZONO (O₃)

7.4.1 Antecedentes generales

El O₃, es considerado uno de los contaminantes secundarios más característicos del smog fotoquímico. La mayoría del O₃ troposférico, es generado indirectamente por la fotodescomposición del NO₂, que genera el radical O(³P) (ecuación XIII), el que reacciona con el O₂.

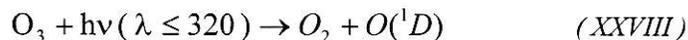


El principal consumo de O₃ es provocado por la reacción con el NO, generándose O₂ y NO₂. Se ha calculado que con una concentración de 1ppm de O₃, la vida media del NO es de 1.8 segundos, con la siguiente reacción (Sanhueza y Lissi 1981):



Por lo tanto, la concentración de O₃ estará determinada por la relación de NO₂/NO y la intensidad de la radiación solar.

La fotólisis del O₃ (reacción XXVIII), es una de las principales fuentes de especies reactivas, como OH, que provocan la remoción de gases de baja solubilidad (metano, terpenos, etc.) y el inicio de las cadenas que generan el smog fotoquímico (reacción XV). La velocidad de formaciones del radical O(¹D) es de aproximadamente 2*10⁶ radicales/cm³ seg.



Otra, será la reacción del O(¹D) con las uniones C-H de los HC. Paralelamente y con un menor grado de importancia el O(³P), reacciona principalmente con los RH y con HC saturados que poseen uniones débiles (ejemplo: aldehídos), generando radicales.

En áreas urbanas, las concentraciones de O₃ son hasta veinte veces mayores que en zonas remotas, como la floresta tropical o zonas marinas (Seinfeld, 1997) (Tabla N° 12).

Concentraciones máximas típicas diarias de O₃ en verano son:

Tabla N° 12 Concentraciones máximas diarias típicas de O₃

Región	O ₃ (ppb)
Urbana – suburbana	100 – 400
Rural	50 – 120
remota Floresta tropical	20 – 40
Remota marina	20 – 40

(Fuente: National Research Council, 1991)

Sin embargo, se ha observado un aumento de la concentración de O₃ en zonas remotas, las que presumiblemente están ligadas a los aumentos de origen antrópico de los NO_x en la atmósfera (de ~10 y 15 ppb a ~30 y 40 ppb).

Debido a que el O₃ absorbe luz en la región de 290 a 320 nm, cambios en la concentración pueden afectar los niveles de exposición a estos rayos (Sanhueza y Lissi, 1981).

7.4.2 Ciclos diarios promedio

El ciclo diario promedio de O₃ (*Figura N° 48*), muestra un sólo incremento de la concentración a la hora de máxima radiación solar (entre las 13:00 y 15:00 hrs, dependiendo de la época de año), el que disminuye rápidamente al atardecer. En cuanto a la variación anual de O₃, se registran las mayores concentraciones en verano y mínimas en invierno. En ambos casos, asociados a la descomposición fotoquímica de NO₂, y al consumo producido por NO, principalmente.

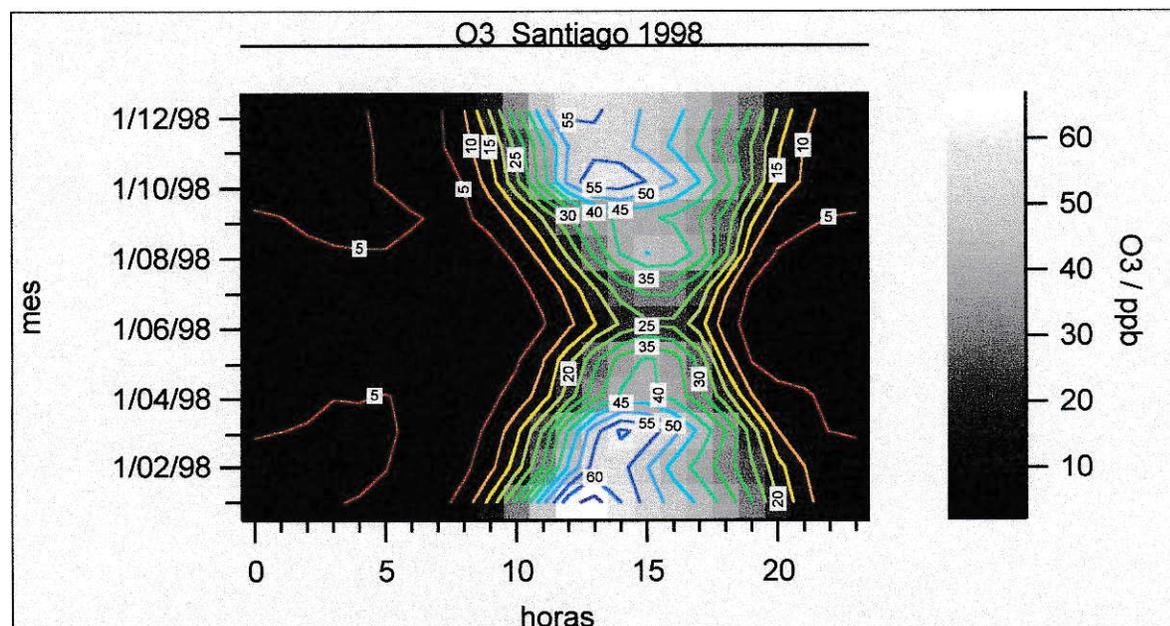


Figura N° 48 Ciclos diario y ciclo anual de O₃ para el año 1998 donde se muestra el comportamiento diario y anual del O₃ (elaboración propia).

El O₃ supera 60 ppb en días verano y 25 ppb en días de invierno (promedio horario mensual para las ocho estaciones en Santiago). Las mínimas concentraciones se miden durante la noche, donde no existe producción de O₃ y por el contrario es removido casi por completo por NO, HO₂, HO, NO₂, entre otros.

7.4.3 Distribución espacial

La distribución espacial del O₃ es producida por un efecto combinado entre el viento, la producción secundaria y la remoción química de este gas. Por este motivo, la mayor concentración diaria se observa durante la hora de máxima radiación solar, situación que coincide con la brisa de valle, provocando altas concentraciones de O₃ en el sector NE de Santiago.

Influenciado por la alta emisión de NO (*Figura N° 75*), la que genera una baja relación NO₂/NO en el centro de la ciudad, y por la brisa de valle, se registran las mayores concentraciones de O₃ en las estaciones periféricas de Santiago, como La Florida y principalmente en Las Condes. Esto debido a que el NO es uno de los principales consumidores

de O_3 y paralelamente el viento lo transporta hacia los sectores más altos de la ciudad (estación de Las Condes), como se ve en la **Figura N° 49**.

A partir de las 20:00 hrs, las concentraciones disminuyen bruscamente y se observan los valores más altos hacia el sector Oeste de Santiago (Estaciones de Pudahuel, Cerrillos y Parque O'Higgins), situación mostrada en la **Figura N° 50**. Ésto, debido a que durante la noche la formación fotoquímica de O_3 se detiene, y el restante es consumido y transportado por la brisa de montaña.

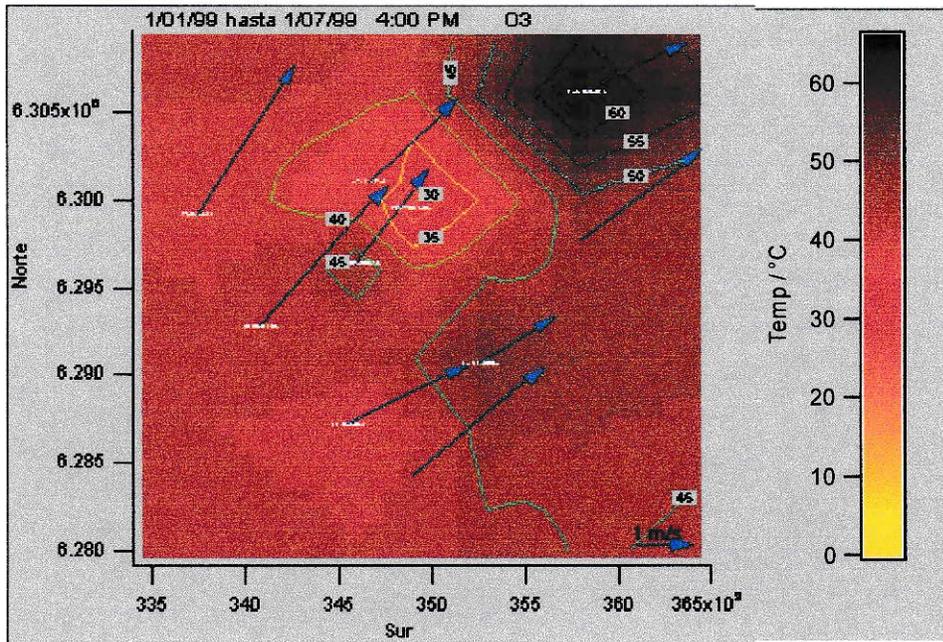


Figura N°49 O_3 a las 16:00 hrs del ciclo promedio diario entre Febrero a Mayo de 1998 (elaboración propia).

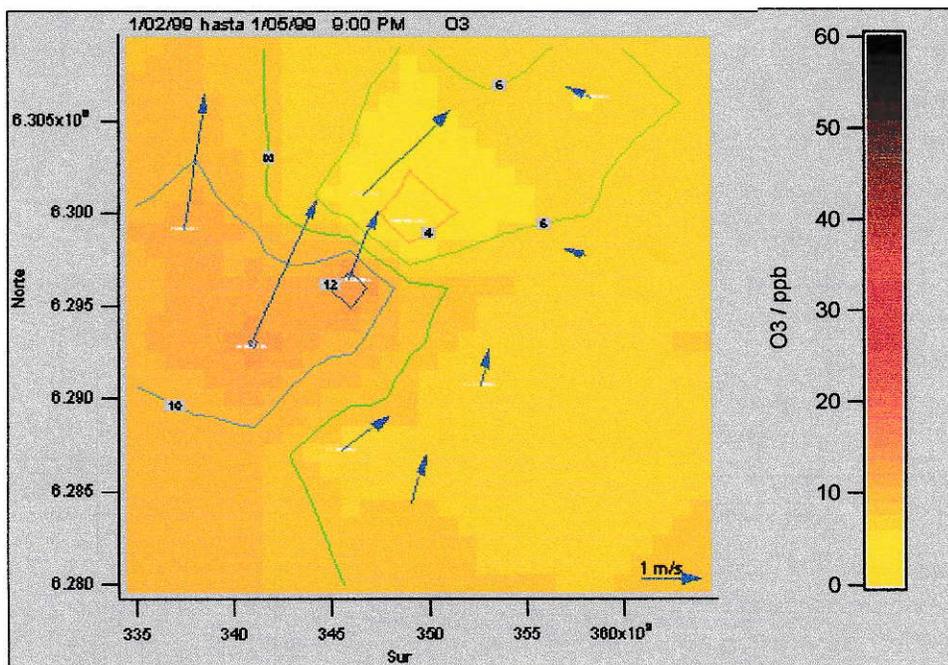


Figura N° 50 O_3 a las 21:00 hrs del ciclo promedio diario entre Febrero a Mayo de 1998. (elaboración propia).

7.4.4 Comparación interanual

Para los tres años en que se ha monitoreado las concentraciones de O_3 por la red MACAM2, no se observa un cambio significativo de las tendencias (*Figura N° 51*).

Tomando en cuenta las investigaciones realizadas en contaminación fotoquímica, un aumento de la relación NO_2/NO dentro de la ciudad, que puede estar causada por un aumento de HC presentes en el aire, provocaría un aparente incremento de las concentraciones de O_3 registradas por la red. Sin embargo, una disminución de las concentraciones de NO , causaría una disminución global del O_3 , situación que sólo podría ser corroborada en lugares más remotos, alejados de la ciudad. Es probable que los máximos de O_3 se produzcan en zonas periféricas a Santiago, dónde no existen mediciones realizadas por la red. Esta hipótesis es parcialmente corroborada con las mediciones realizadas por el CENMA en el sector de Peldehue (Colina), lugar en el que se registraron concentraciones elevadas de O_3 (≈ 80 ppb), para una zona rural.

Debido al efecto complejo de la interacción entre HC presentes en la atmósfera y la mezcla de óxidos de nitrógeno, una disminución de las emisiones de NO , no necesariamente se producirá una menor concentración de O_3 medidas en las estaciones de la red. Teniendo en cuenta lo descrito, se recomienda buscar, mediante estaciones móviles continuas, el lugar de máximo impacto de O_3 , el que debería estar ubicado en el sector NE, fuera de la ciudad.

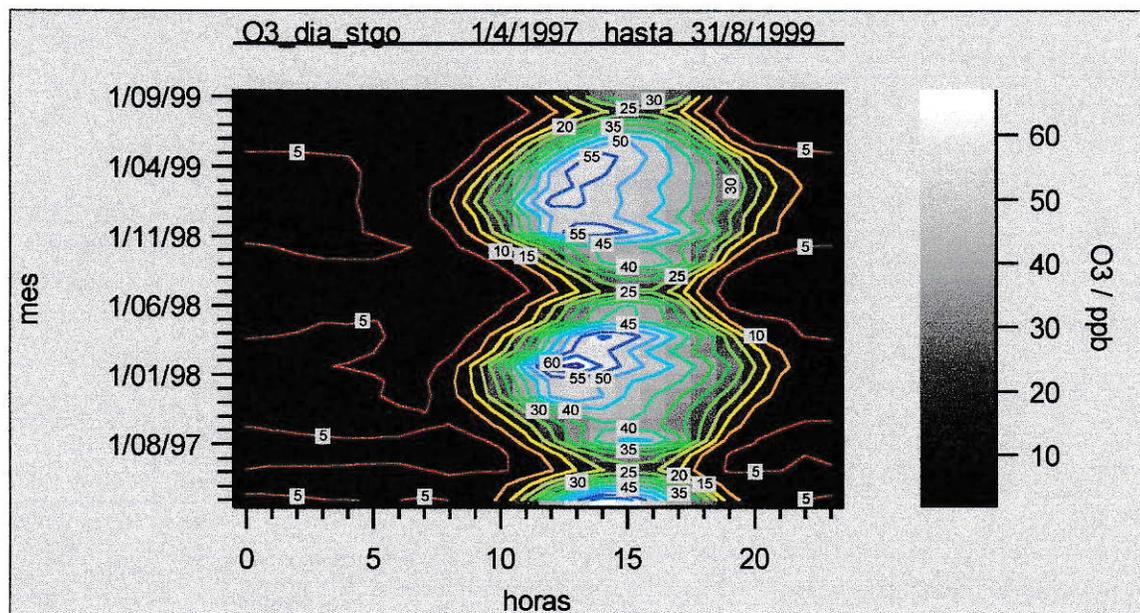


Figura N°51 comparación interanual de las concentraciones de O_3 , para el período del 1 de Abril de 1997 al 31 de Agosto de 1999 (elaboración propia).

7.5 MATERIAL PARTICULADO (PM10)

7.5.1 Antecedentes generales

El material particulado y aerosoles atmosféricos se definen como la suspensión en el aire de finas partículas sólidas o líquidas (Schmauss, 1920).

Según sus fuentes, el aerosol puede clasificarse como aerosol primario o secundario. Al aerosol primario pertenecen las partículas que son emitidas directamente por las fuentes, como vehículos, fundiciones, etc. En cambio, el aerosol secundario se refiere a aquellas partículas que son formadas en la atmósfera por procesos fisicoquímicos, como la condensación de vapor, o la reacción entre especies químicas, entre otros.

El tamaño de las partículas, puede variar de unos pocos nanómetros a unas decenas de micrómetros, situación que está íntimamente ligada a su origen (*Figura N° 52*). Las partículas finas inferiores a 2,5 μm de radio aerodinámico, son generadas principalmente por procesos de condensación, coagulación y agregación de compuestos químicos de baja volatilidad. En cambio, la fracción gruesa (partículas superiores a 2,5 μm), son emitidas principalmente por procesos mecánicos, como el levantamiento de partículas por el viento u otro medio (Colbeck, 1995).

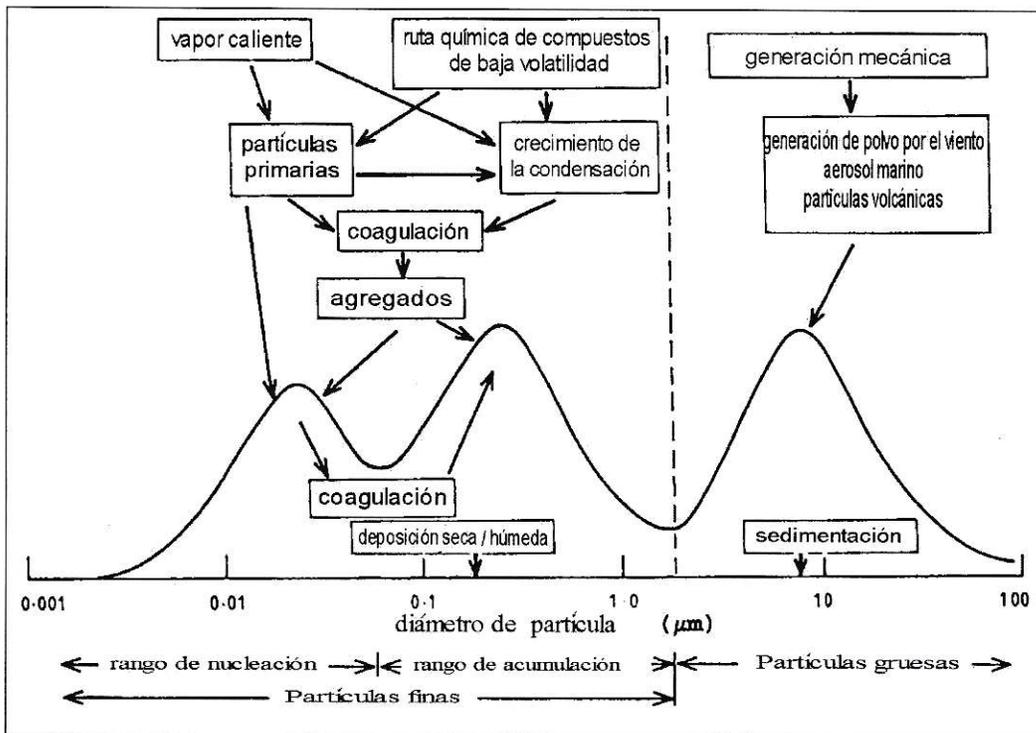


Figura N°52 Esquema que representa la distribución típica y mecanismos de formación del material particulado en la atmósfera (Adaptado de The U.K. Department of Enviroment, 1993).

La fracción fina está compuesta principalmente de sulfato, nitrato, carbono orgánico (OC) y carbono elemental (CE). En cambio en la fracción gruesa predomina el material

cristalino (Si, Al, Ca, Fe, K, Ti, Mn, Sr, etc.) y otros componentes como sal de mar, carbono elemental (CE) y una serie de compuestos orgánicos (Rogge et. al. 1993).

El carbono elemental, también llamado carbono negro (black carbon), carbono grafito u hollín, tiene una estructura química similar al grafito impuro, el que es emitido directamente a la atmósfera, principalmente por procesos de combustión. Por otra parte, el carbono orgánico puede ser emitido directamente (OC primario) o formado en la misma atmósfera (OC secundario), por condensación de productos de baja volatilidad, en la fotooxidación de HC (Samara, 1995).

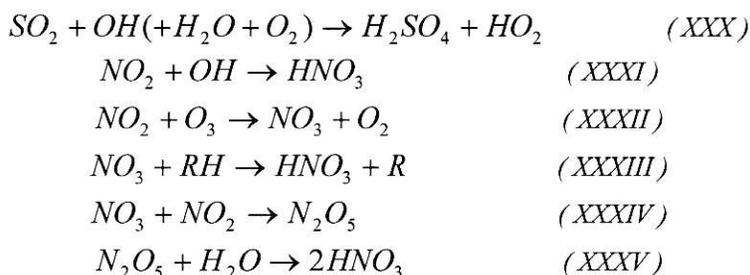
Debido a la gran cantidad de fuentes que originan este contaminante resulta complejo describir su origen. Las estimaciones globales de material particulado se muestran en la **Tabla N°13**, dónde se observa que el principal aporte antrópico, corresponde al material particulado secundario.

Tabla N° 13 Emisiones globales estimadas de material particulado

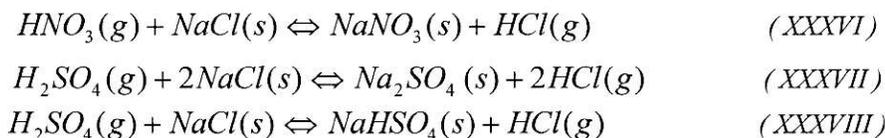
Fuente	M Ton de partículas
Natural	
Primario	2880
Secundario	240
Antropogénico	
Primario	110
Secundario	340
TOTAL	3570

(Fuente: Kiehl and Roche, 1995)

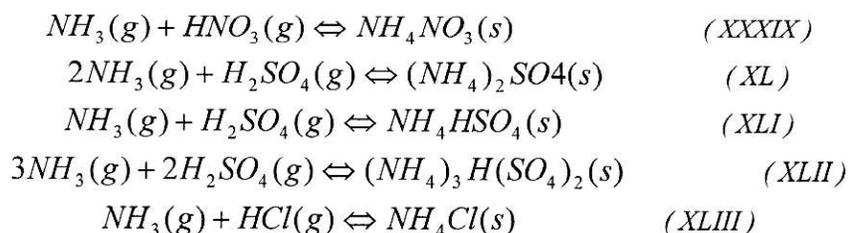
Las principales reacciones, que originan a los precursores del aerosol inorgánico secundario a partir de sulfato y nitrato en fase gaseosa son (Spyros N. Pandis et al, 1995).



Los gases precursores reaccionan reversiblemente con los aerosoles marinos que están formados principalmente de NaCl:



Otro precursor de aerosoles, es el amoniaco (NH₃), el que es originado mayoritariamente en procesos biológicos. Este gas reacciona con el sulfato o nitrato, neutralizándolos y formando aerosoles.



Cuando la humedad es alta y se forma una solución en las partículas, estas sales se disocian en sus respectivos iones.

Las emisiones estimadas de PM10 para el año 1997 por el inventario de emisiones de Santiago, se muestran en la **Tabla N° 14**. La principal fuente emisora de PM10, es el polvo resuspendido de las calles.

Tabla N° 14 Estimación de emisiones de PM10 por el inventario de emisiones para la ciudad de Santiago durante el año 1997.

Actividades y fuentes relacionadas con :	PM10 Ton / año
Transporte	2731
Industria, comercio, construcción	3176
Agricultura	1532
Domésticas	1359
Polvo resuspendido	32986
TOTAL	41784

Fuente CONAMA-RM, 1998

Según el inventario de emisiones, un 79 % de material particulado provenía del polvo levantado del suelo. Sin embargo, los análisis químicos de PM10 suspendido en la atmósfera, muestran una proporción mucho menor de polvo del suelo. Esto se debe a que las partículas de polvo del suelo tienen tamaños más grandes y decantan más rápido, que partículas provenientes de procesos de alta temperatura (combustión, hornos, etc.), de menor tamaño y por lo tanto, mayor tiempo de residencia en la atmósfera.

De los análisis fisicoquímicos realizados al material particulado en Plaza Gotuzzo (Sao Paulo- USACH, 1996), se concluye que el transporte tiene una responsabilidad de 25% del total del material particulado. Además, el transporte produce la mayor parte del polvo resuspendido (33%) y en conjunto con otras actividades ligadas a la industria (entre ellas, la calefacción) y el comercio, son responsables de la formación de un 37,5% del material particulado secundario. El resto (4,4 %) corresponde a contribuciones de fundición de cobre de regiones vecinas a la Metropolitana.

En Santiago y especialmente en el sector NorOriente, el material particulado secundario tiene una gran importancia (53,7 % de la masa total de PM10). En segundo lugar se encuentra el material particulado resuspendido por el transporte y en tercer lugar las actividades agrícolas y las relacionadas con el uso del cloro con un 14,5%. Por último las actividades provenientes de fundiciones de cobre fuera de la capital, aportan un 6,4 % del material particulado en Santiago (CONAMA RM, 1997).

A partir de la distribución espacial de las emisiones primarias de PM10 en Santiago durante el escenario de 1998, presentados en las *Figuras N° 77 y 78*, se puede concluir que las principales fuentes de emisión corresponde a vehículos. Estas son emisiones directas por los tubos de escapes de los vehículos o polvo resuspendido al desplazarse. Su distribución, debido a su origen, es muy similar al observado para el CO: alta en el centro y menor a medida que se aleja hacia la periferia. En cambio, las fuentes fijas más importantes para Santiago (>5 g/s/km²), son pocas y se distribuyen aleatoriamente.

7.5.2 Ciclos diarios promedio

Uno de los contaminantes primarios medidos más difícil de describir es el PM10, debido al mayor número de fuentes que lo originan y procesos de remoción. Por este motivo, las tendencias anuales y diarias observadas en la *Figura N° 53*, poseen una mayor variabilidad, al compararlas con las tendencias observadas para el CO, por ejemplo.

El aumento de la concentración de material PM10, al igual que cualquier contaminante, está influenciado por la disminución de la ventilación. Por ésto, las mayores concentraciones anuales, son registradas en la época de invierno, cuando la ventilación de la cuenca es menor. Sin embargo, altas velocidades del viento provocan levantamiento de polvo (fracción gruesa principalmente), situación que puede ser observada en tardes de verano, generando un leve incremento de la concentración de PM10, menor a la esperada para un gas poco reactivo como el CO.

Bajas concentraciones de material particulado son medidas durante la madrugada (alrededor de las 5:00 hrs), momento en el que la circulación vehicular y la velocidad del viento son las menores del día.

El máximo de la mañana comienza a las 6:00 hrs. y termina alrededor del medio día, con una concentración máxima de PM10 a las 8:00 hrs. en verano y las 9:00 hrs. en invierno. Este máximo, es provocado por un aumento de las fuentes antrópicas (vehículos principalmente) y una menor altura de capa de mezcla, producida por la inversión térmica nocturna (en la noche previa).

Durante la tarde, en la mayoría de las estaciones (exceptuando Las Condes) se mide una disminución de las concentraciones de PM10, asociada al mayor factor de ventilación. Sin embargo esta disminución es menor que la esperada (al compararla con el CO) debido a una mayor resuspensión del PM10 por efecto del viento y / o el aumento del aerosol transportado desde zonas remotas. Esta razón explica en parte, las concentraciones relativamente constantes de PM10 durante todo el año.

La estación Las Condes es la única en registrar un sólo incremento de PM10 alrededor de las 17:00 hrs., comportamiento que también se observa en los otros contaminantes y que se atribuye al transporte producido por la brisa de valle.

El máximo nocturno de PM10, se puede distinguir en los meses de invierno, comienza alrededor a las 18:00 hrs. y termina a las 4:00 hrs..

La estación de Pudahuel, durante la noche es la que registra las mayores concentraciones de PM10. Situación que se atribuye a la dirección de los vientos nocturnos, baja altura de capa de mezcla y una probable formación de aerosol secundario.

En el ciclo diario, es posible distinguir el efecto de las emisiones antrópicas para el máximo de la mañana y de la noche, especialmente en invierno.

7.5.3 Distribución espacial

El ciclo diario típico de PM10, durante las mañanas del año 1998, muestra a las 8:00 hrs. un incremento de las concentraciones en las estaciones periféricas. Primero ocurre en las estaciones del Bosque y Pudahuel, luego se extiende hacia Parque O'Higgins y La Florida. Las concentraciones máximas se registran a las 10:00 hrs. en el sector SE de la ciudad (estación de La Florida). Este comportamiento es atribuible, al igual que para el caso del CO, al desplazamiento de los ciudadanos a sus actividades diarias, en los distintos medios de transporte que emiten directa o indirectamente PM10.

Alrededor del mediodía, el traslado de las fuentes móviles hacia el centro de la ciudad, la mayor ventilación y el aumento del volumen de mezcla, son las variables responsables de diluir y desplazar las concentraciones de PM10 hacia las estaciones céntricas.

A partir de las 16:00 hrs., se puede distinguir una mayor concentración de PM10 en la estación de Las Condes. Al igual que para los otros contaminantes, el efecto de la brisa de valle es el responsable de su traslado.

Desde las 22:00 hrs. y hasta las 7:00 hrs. se observa un flujo de viento ladera abajo (brisa de montaña), el que diluye y transporta el PM10 desde Las Condes y La Florida hacia el centro y sector Poniente de la ciudad (Pudahuel), situación que se muestra en la **Figura N°54**.

7.5.4 Caso de la estación de Pudahuel

La estación de Pudahuel, ha presentado los índices de contaminación por PM10, más altos durante los episodios de contaminación, por este motivo se decidió dar un especial énfasis a este punto.

Para encontrar las variables atmosféricas asociadas a los episodios de contaminación en Pudahuel, se graficó el viento versus la concentración de PM10 de la estación de Pudahuel, situación en la que se pudo concluir lo siguiente: altas concentraciones de PM10 en la estación de Pudahuel, se asocian con bajas velocidades de viento, pero no existe una relación directa entre la dirección del viento y la concentración medida en esta estación.

Por este último motivo y teniendo en cuenta que, altas concentraciones de material particulado están asociados con la ocurrencia de condiciones atmosféricas tipo A, se decidió observar la relación que tenía el viento en una estación precordillerana (Las Condes), con la concentración de material particulado en la estación de Pudahuel.

Al graficar los vientos en Las Condes con las concentraciones en Pudahuel (**Figura N°55**), observamos que las máximas concentraciones de PM10 generalmente están relacionadas con aumentos flujos de descenso desde los valles precordilleranos (brisa de montaña).

Sin embargo, esta tendencia resulta ser más marcada con un contaminante gaseoso como el CO o NO. Esta situación, puede estar reflejando emisiones locales esporádicas de PM10 en Pudahuel, o bien, una mayor decantación del material particulado.

Un gráfico similar al anterior, pero ahora con viento en Cerrillos (**Figura N°56**), muestra la relación que tiene el viento Este sobre las concentraciones de material particulado.

Lo previo permite concluir que, altas concentraciones de material particulado en Pudahuel están asociadas a un aumento de la brisa de montaña, transportando el PM10 desde las zonas céntricas y Oriente de la ciudad hacia zonas mas bajas de la cuenca.

Se a verificado también que existe una relación entre el aumento del viento cordillerano nocturno con la disminución de la altura de capa de mezcla, situación generalmente observada en los episodios de contaminación. Por este motivo, se decidió calcular el factor de ventilación en días de episodio para la estación de Pudahuel (*Figura N° 63*). Así, se pudo concluir que un bajo factor de ventilación en la estación de Pudahuel era causante de una alta concentración de PM10 en esta estación. Situación que obedece a una acumulación de emisiones locales de PM10 provocada por una baja dispersión, principalmente nocturna.

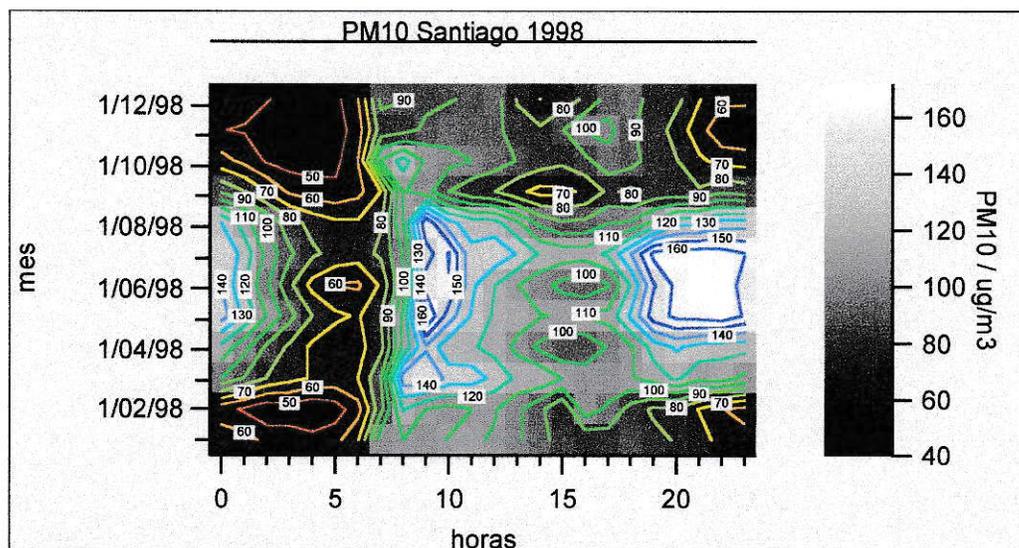


Figura N°53 Ciclos diarios promedio mensual de PM10 para el año 1998, donde se muestra el comportamiento diario y anual del PM10

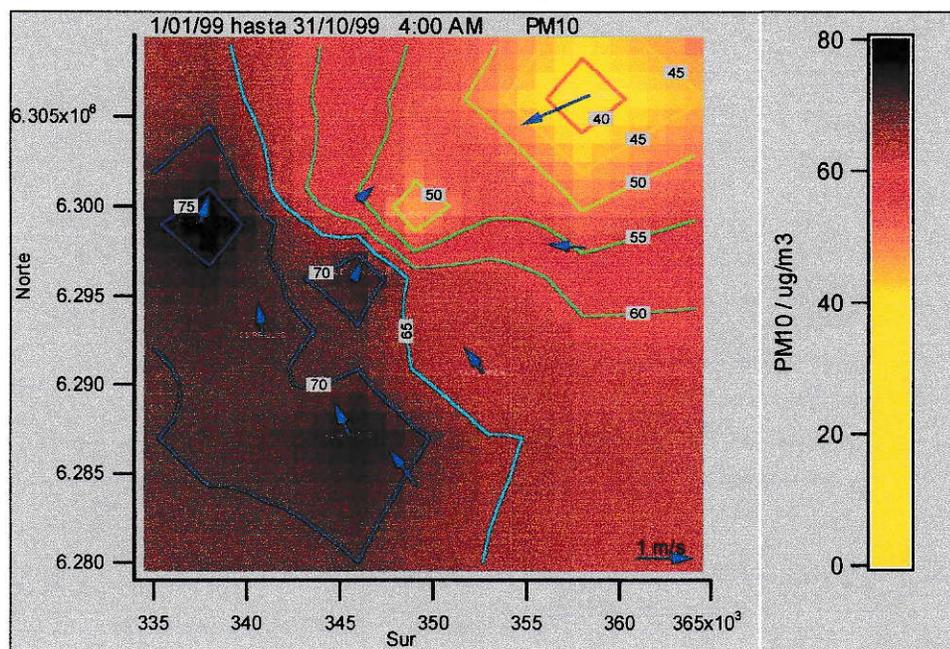


Figura N°54 PM10 a las 4:00 hrs del ciclo promedio diario entre Enero y Octubre de 1999 (elaboración propia).

En mediciones realizadas por el CENMA, a petición de CONAMA, se ha observado una alta concentración de aerosol constituido por nitratos en la estación de Pudahuel. Junto a ello, se ha podido observar, que las concentraciones promedios de NO y NO₂ descienden en

forma notoria en las estaciones de Pudahuel y Cerrillos, en horas de la noche. De esta última observación surge una interrogante: ¿Por qué en estas estaciones la disminución es más significativa que en otras?. Tomando en cuenta la bibliografía y considerando las variables ambientales, se decidió observar el efecto catalítico que ofrecería el material particulado (el que incrementa su concentración durante la noche en Pudahuel y Cerrillos), para la remoción en fase heterogénea del NO y NO₂. Para ello, se observó la relación entre las concentraciones nocturnas de PM10 y NO_x, de lo que se pudo encontrar que, concentraciones superiores a los 200 µg/ m³ provocan una notoria disminución de las concentraciones de NO y NO_x en la estación de Pudahuel. Esta situación podría revelar el efecto catalítico que tendría el material particulado para formar una mayor cantidad de material particulado de tipo secundario. Sin embargo, ésta observación debe ser corroborada con información de monitoreo continuo de NO_x, que ofrezcan un mayor confiabilidad, que la usada en este trabajo.

De lo anteriormente expuesto se puede colegir, que las altas concentraciones de PM10 en Pudahuel obedecen a una confluencia de variables, las que lamentablemente suelen ocurrir en días de episodio, constituyéndose alertas, pre-emergencias y emergencias ambientales. Estas variables en forma resumida son:

- Transporte de contaminante en horas de la noche, desde el centro y Oriente de la ciudad hacia la estación de Pudahuel, principalmente.
- Un bajo factor de ventilación en la estación de Pudahuel, lo que provoca una acumulación de los contaminantes localmente emitidos.
- Condiciones favorables para una mayor formación de aerosol secundario, principalmente nitratos.

7.5.5 Comparación interanual

Durante los inviernos del año 1997 al 1999, existe una disminución significativa de la concentración de PM10, tanto para el máximo de la mañana (9:00 hrs.) como el de la noche (22:00 hrs). A estas horas, la disminución porcentual del PM10 es mayor que la experimentada por el CO. En horas de la tarde, no se observa una disminución significativa de las concentraciones interanuales, momento en que existe un incremento de la velocidad del viento.

En los ciclos diarios de verano (*Figura N° 57*), se observan concentraciones de PM10 que tienden a permanecer constantes durante el día. Las contracciones en horas de la tarde durante todo el año, las que son elevadas, si consideramos un mayor factor de ventilación, y la concentración constante durante los días de verano, en parte pueden atribuirse a un mayor levantamiento de polvo por efecto del viento, situación que no ocurre en las mañanas y noches de invierno. Otro factor asociado, podría ser el mayor transporte del aerosol desde zonas remotas

Al comparar los tres años de mediciones en la *Figura N° 58*, se observa una disminución aproximada de un 22 % (entre los máximos del 1997 y el 1999) a las 20:00 y un 19 % a las 9:00 hrs.. No se observa tendencia para las concentraciones durante la tarde.

Esta disminución de las concentraciones, son atribuibles a las medidas de control de emisiones, al cambio tecnológico, cambio en los combustibles fósiles, mejores tecnologías de abatimiento de las fuentes emisoras y la pavimentación y limpieza de calles.

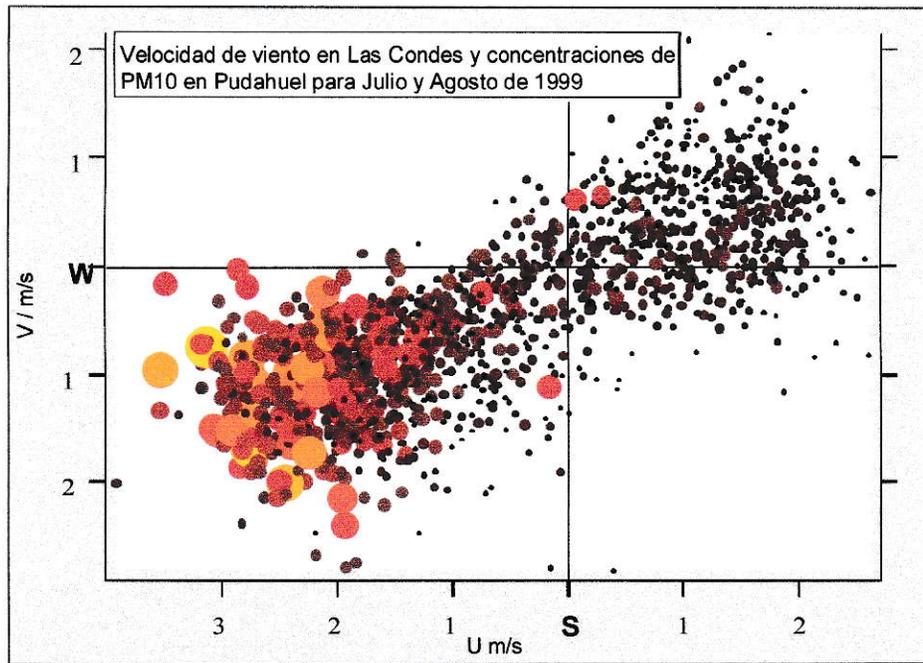


Figura N°55 Dirección y velocidad del viento en Las Condes (posición del punto) versus concentración de PM10 en Pudahuel (tamaño del punto) (elaboración propia).

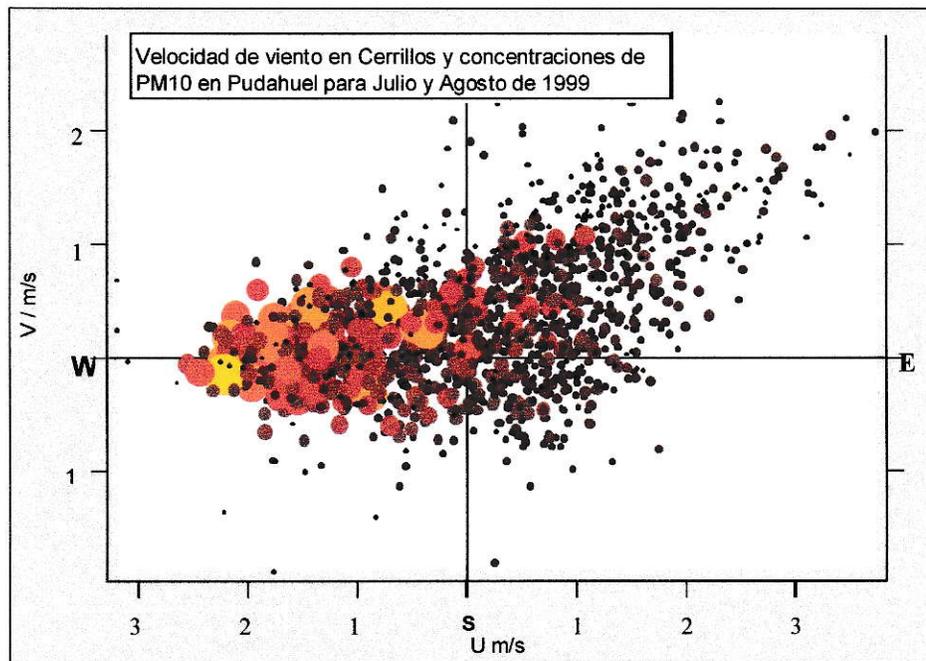


Figura N°56 Dirección y velocidad del viento en Cerrillos (posición del punto) versus concentración de PM10 en Pudahuel (tamaño del punto) (elaboración propia).

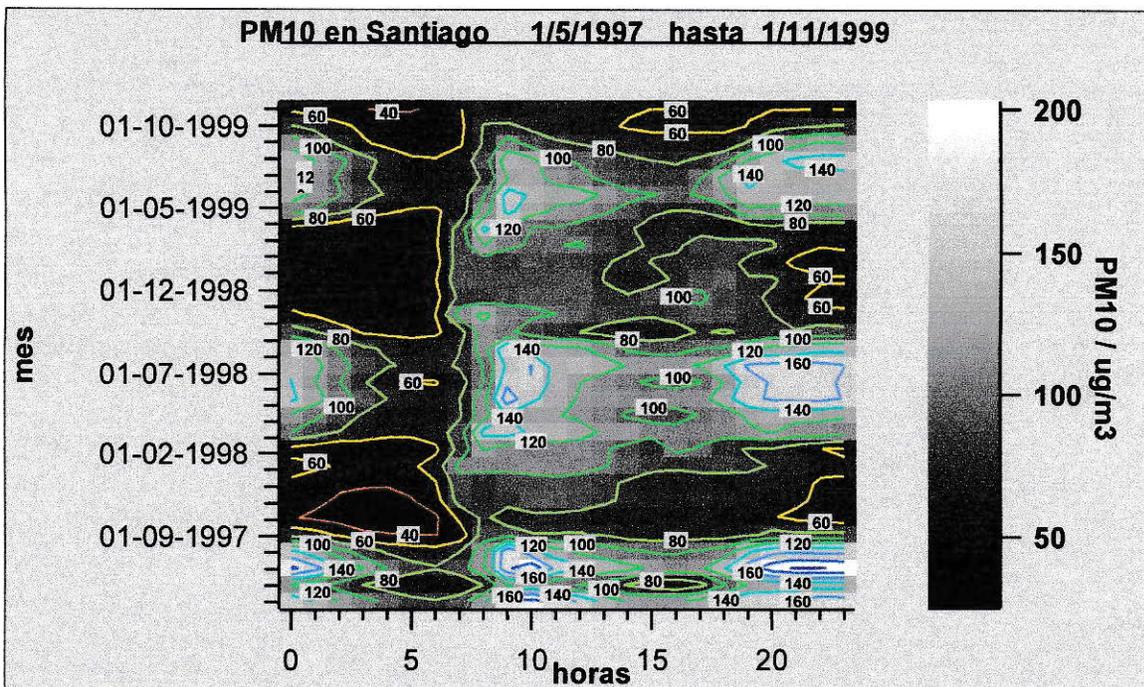


Figura N°57 Ciclos diarios promedios mensual de PM10 entre Mayo de 1997 y Noviembre de 1999 (elaboración propia).

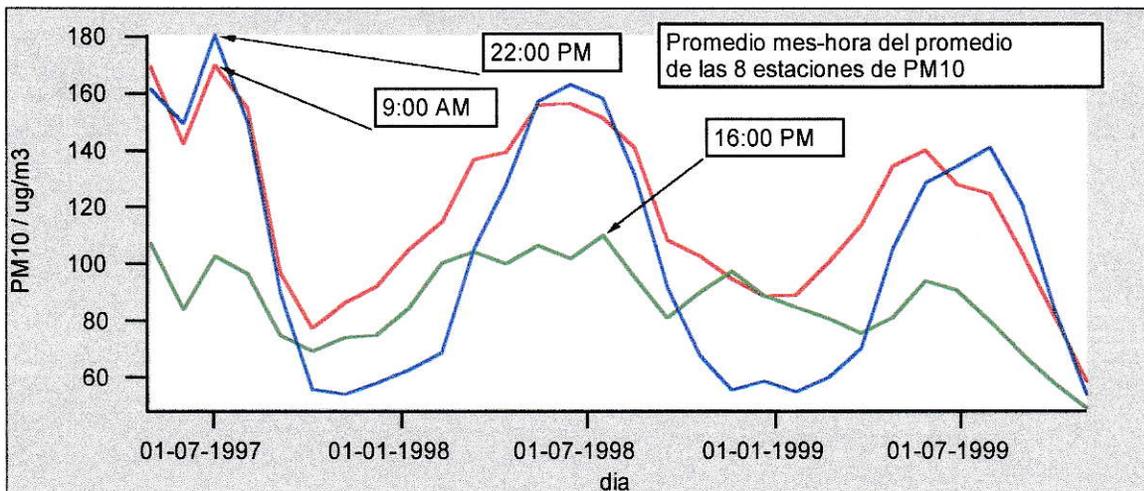


Figura N°58 Curvas obtenidas a partir de la interpolación de las concentraciones promedios mensuales para las 22:00 hrs., 9:00 hrs. y 16:00 hrs. entre Julio de 1997 y Julio de 1999 (elaboración propia).

8 EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM10

Los factores que desencadenan y conforman un episodio de contaminación atmosférica son múltiples. Entre otros, puede nombrarse una disminución de la altura de capa de mezcla, debilitamiento de los vientos diurnos, acumulación de contaminantes en la atmósfera local, aumento de la radiación solar. Todas ellas contribuyen a generar concentraciones de contaminantes peligrosas para la salud de la población.

El episodio de contaminación atmosférica tipo A (los más comunes y con notorio aumento de la contaminación) (Sarabia, 2000), comienza con una irrupción de una dorsal cálida en la tropósfera media sobre la zona central, situación que genera la aparición de la vaguada costera, provocando fortalecimiento de la brisa de montaña. Ésto causa una compresión adiabática de los gases, generando un aumento de temperatura del aire y por lo tanto, una inversión térmica en altura. Junto a ello, aumenta el transporte nocturno de contaminantes desde sectores precordilleranos hacia los valles y zonas bajas de éstos, en toda la región central, causando en última instancia, altas concentraciones de PM10.

Otra característica general, importante de destacar en días de episodio al compararlos con otros días de invierno, es su menor comportamiento caótico (al ser observadas las variables en atractores), lo que permite comprender y en un futuro predecir de mejor forma el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Incluso, mientras más intenso sea el episodio, menor será el nivel de caos observado.

Por este motivo, se escogió el episodio ocurrido entre el 12 al 20 de Mayo del 1998. Este episodio es el de mayor duración y con más altas concentraciones registradas por la red MACAM 2.

8.1 Factores meteorológicos

Durante los días de episodio, se observó un aumento de la radiación incidente, causado principalmente por la ausencia de nubosidad y baja humedad del aire. La mayor cantidad de radiación, generó a su vez, un incremento de la temperatura del aire, favoreciendo su mezcla convectiva y provocando que la altura de capa de mezcla, ascienda hasta el límite inferior de la inversión térmica de subsidencia.

En los primeros días (12 de Mayo), antes de originarse las concentraciones críticas de PM10, se observó un aumento de la altura de capa de mezcla máxima (*Figura N° 59*). Sin embargo, producto del fortalecimiento de la vaguada costera, se estimó una disminución sistemática de la altura de capa de mezcla, durante los días de episodio.

Las temperaturas nocturnas, comenzaron a aumentar a medida que transcurrieron los días de episodio, lo que está directamente relacionado con la mayor temperatura diurna y al descenso de vientos cálidos nocturnos de la cordillera (situación de vaguada costera). Resultó interesante observar, que todas las estaciones en las noches de episodio, en especial en la madrugada del 16 de Mayo (día de máxima concentración de PM10 en Pudahuel), mostraron una mayor diferencia de temperatura, llegando a ser de cinco grados entre Pudahuel y Las Condes. Esta diferencia térmica en el día disminuye durante el episodio, lo que se podría traducir en el día como menor efecto del ascenso del aire y en las noches mayores efectos, con un fortalecimiento de los vientos con dirección a Pudahuel, provocados por la vaguada costera.

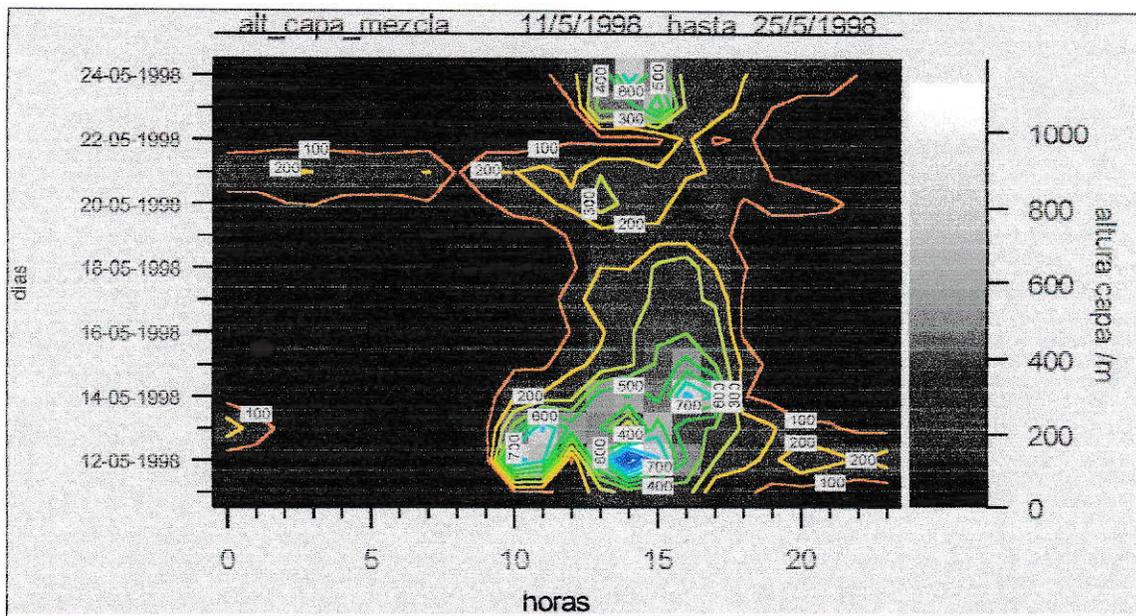


Figura N°59 Ciclos diarios de la altura de capa de mezcla durante el episodio de contaminación atmosférica desde el 11 al 24 de Mayo (elaboración propia).

La dirección del viento es similar al promedio invernal observado en la ciudad, es decir, durante el día la dirección del viento es SW en todas las estaciones (Figura N° 60) y en las noches existe un descenso desde las cuencas cordilleranas hacia el sector Poniente (Figura N° 61).

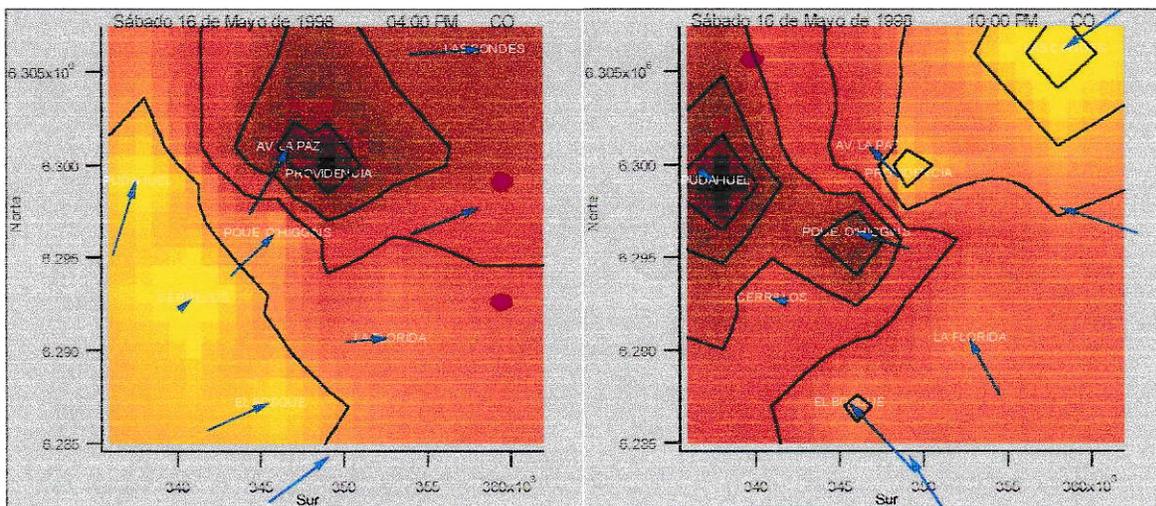


Figura N° 60 y Figura N° 61 Circulación del viento durante el día y la noche del 16 de Mayo en que ocurrió el máximo de concentración de PM10 en Pudahuel (elaboración propia).

No obstante, la velocidad del viento en el día, al compararla con días sin episodio, se ve reducida su intensidad para todas las estaciones del sector céntrico y Oeste de la ciudad, lo que genera una notoria disminución de la ventilación sobre estas zonas. Sin embargo, en la noche las estaciones de Las Condes y La Florida (cercanas a la cordillera), aumentan significativamente la velocidad de los vientos, provocando un transporte de los contaminantes hacia las zonas bajas de la ciudad. En especial, es interesante el flujo que se produce por la cuenca del río Maipo que transporta el aire contaminado desde la zona Sur de la ciudad hacia estaciones como Cerrillos y Pudahuel.

Las máximas concentraciones de contaminantes, ocurren en las noches en que todas las estaciones del sector Sur de la ciudad muestran la dirección del viento hacia la estación de Pudahuel o sus cercanías. La estación de Pudahuel, para estos días registra vientos con baja velocidad y con una tendencia a la convergencia hacia este lugar, del viento de las otras estaciones.

Esto se puede comprobar, al relacionar el comportamiento del viento, en estaciones como Las Condes y La Florida influenciadas por la brisa montaña, con las concentraciones de PM10 registradas en Pudahuel (*Figura N° 62*). Los resultados muestran, que velocidades de viento nocturno superiores a 1,3 m/s en La Florida, están relacionadas con diecisiete días con concentraciones promedio nocturnas superiores a 300 ug/m³ de PM10 en Pudahuel. Por el contrario, a menor velocidad de viento en las estaciones del sector Oriente, las concentraciones de PM10 en Pudahuel, también disminuyen.

Los perfiles mostrados en la Figura N° 62 corresponden a ciclos diarios promedio de PM10 en Pudahuel, los cuales fueron separados según la velocidad del viento nocturno medido en La Florida en los intervalos 0,3 a 0,65 m/s; 0,65 a 1m/s; 1 a 1,3 m/s y mayor a 1,3 m/s. No se observan velocidades de viento entre los 0,65 y 1 m/s, para el período comprendido entre Mayo y Octubre de 1998.

La ventilación de la cuenca puede ser expresada en un modelo caja simple, como el producto entre la velocidad del viento y la altura de capa de mezcla (*Figura N° 63*). El producto de estos dos últimas variables meteorológicas, se denomina factor de ventilación, el que está inversamente relacionado con las concentraciones de contaminantes.

Se ha observado para el día 16 de Mayo, una reducción del factor de ventilación en la estación de Pudahuel, el que se asocia al máximo de concentración registrada en esta misma estación.

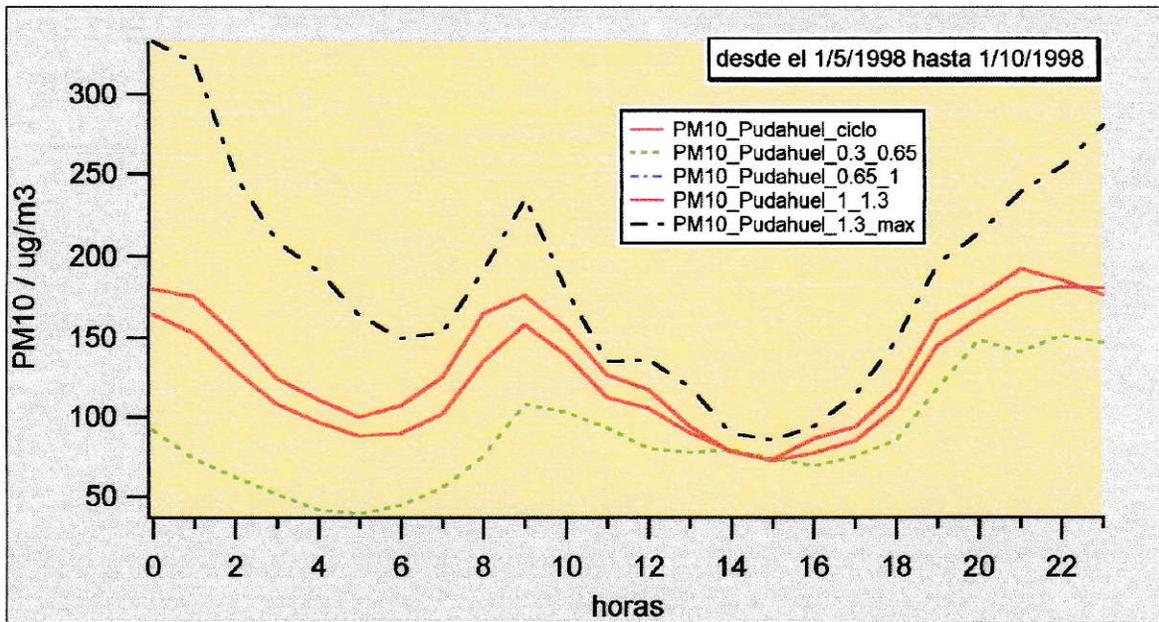


Figura N°62 Ciclos diarios de PM10 entre Mayo y Septiembre del 1998, subdivididas según la velocidad del viento nocturno en La Florida (elaboración propia).

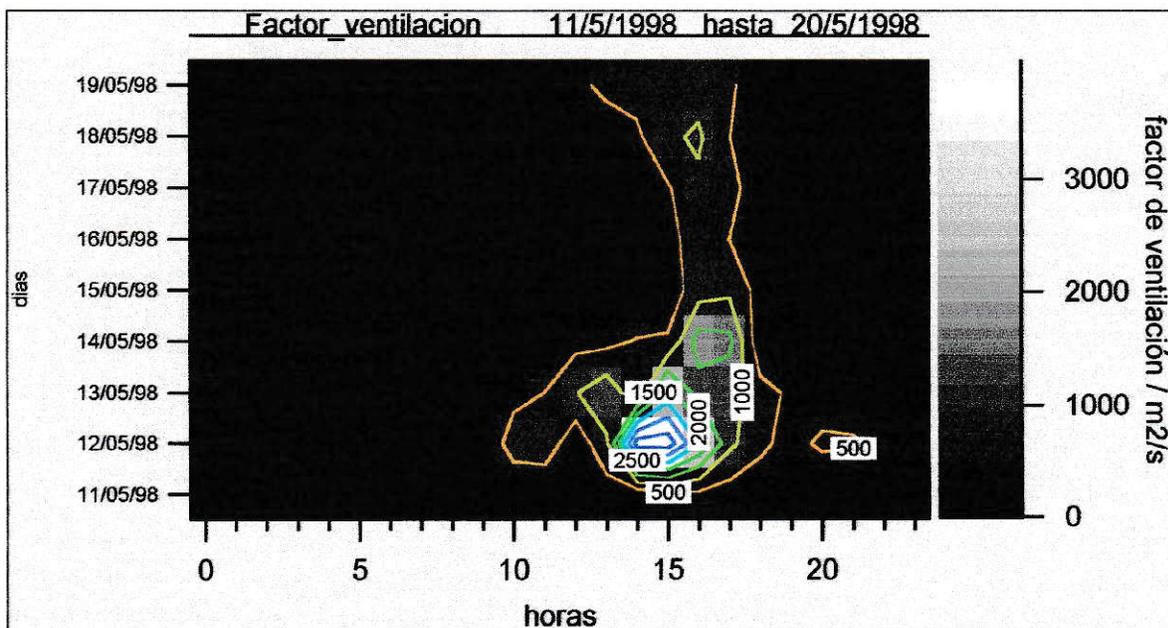


Figura N°63 Evolución del factor de ventilación entre el 11 y 19 de Mayo del 1998. Se puede observar una disminución progresiva de la ventilación en horas de la tarde hasta el día 16 (elaboración propia).

8.2 Contaminantes monitoreados por la red

Durante el episodio, se observó un aumento generalizado de todos los contaminantes medidos por la red, causado en gran parte, por un menor factor de ventilación, lo que generó una acumulación de los gases y aerosoles en la cuenca atmosférica de Santiago.

En los primeros días de episodio, se observaron condiciones meteorológicas que favorecieron la incorporación de SO₂ a la ciudad de Santiago (ver Capítulo 7.2), generando dos episodios de SO₂ para los días 14 y 17 de Mayo (*Figura N° 64*). A la mañana siguiente de ocurrido el episodio de SO₂ (alrededor de las 10:00 hrs), existe un segundo incremento de la concentración de este contaminante, situación asociada a un mezclado desde la capa residual nocturna existente del día anterior.

En cámaras de simulación, se ha observado que el SO₂ al oxidarse a H₂SO₄ en fase homogénea, genera el radical HO₂, el que es capaz de oxidar el NO a NO₂. Ésto indirectamente causa un aumento de las concentraciones de O₃, situación que es observada durante estos días de episodio. Junto a esto, se ven favorecidas las condiciones para la formación de aerosoles secundarios de sulfatos y nitratos (ver reacciones), los que podrían explicar parte de la variabilidad del material particulado fino y grueso, respectivamente en Santiago.

El episodio de SO₂ incorpora directamente material particulado, incluso en mayor proporción de lo que lo hacen las reacciones de formación de aerosol secundario sobre la ciudad. Ésto se puede comprobar al observar la relación PM10 / CO, donde se eliminan en gran medida las variables meteorológicas y las emisiones de PM10 producidas por la circulación vehicular, observándose incrementos de la relación en forma simultánea a los aumentos de SO₂.

Paralelo al episodio de SO₂, existe un aumento de la relación NO₂/NO, situación que se puede justificar a través del aumento de la oxidación de NO a NO₂ por el radical HO₂ generado en la oxidación de SO₂ y por una mayor radiación solar incidente, producida por los días más despejados.

Una de las situaciones químicas más interesantes observadas el día 16 de Mayo, es el notable aumento que experimentó el NO y NO₂ (este último principalmente) en las estaciones de La Paz y Providencia, a las 13:00 hrs.. Esta situación es anormal, ya que el máximo de NO₂ ocurre alrededor de la 11:00 hrs. y podría ser responsable de un incremento en la formación de las especies típicas del smog fotoquímico, como compuestos carbonílicos, peróxidos, hidroperóxidos, peroxiacil nitratos, nitratos de alquilos, entre otros y un aumento en la producción de aerosoles.

En Pudahuel, se ha podido observar que concentraciones de PM10 superiores a 200 ug/m³, está asociada a una disminución de las concentraciones nocturnas de NO₂ y NO. Ésto puede ser explicado por el efecto de la superficie de las partículas como catalizadores en fase heterogénea para la remoción de NO y NO₂, formando más PM10, pertenecientes a la fracción gruesa.

Asociado a la mayor cantidad de material particulado fino, se registró una leve disminución de la radiación incidente en La Platina, sobre todo para la tarde del día 16 de Mayo, día que se registró la mayor concentración de PM10. Esta disminución de la radiación podría ser el factor que provoco que el O₃ alcanzara concentraciones menores a las esperadas (alta relación NO₂/NO), situación que pudo ser corroborada al día siguiente con un aumento del O₃, al incrementarse la radiación, por la disminución del PM10.

Un contaminante primario como el CO sufre un aumento de concentraciones principalmente nocturnas, producidas principalmente por el menor grado de ventilación.

En las noches de vaguada costera, en zonas altas de la capital (como lo son la estación de La Florida y Las Condes), el efecto de transporte del viento tiene gran importancia en remover los contaminantes hacia zonas bajas (estación de Pudahuel, por ejemplo). En estos últimos lugares (estación de Pudahuel), se registra una mayor disminución PM10, si lo comparamos con el CO, situación que puede ser explicada a través de una mayor precipitación producida por la baja velocidad del viento y mayor masa y el menor grado de transporte que experimenta el PM10 frente al CO.

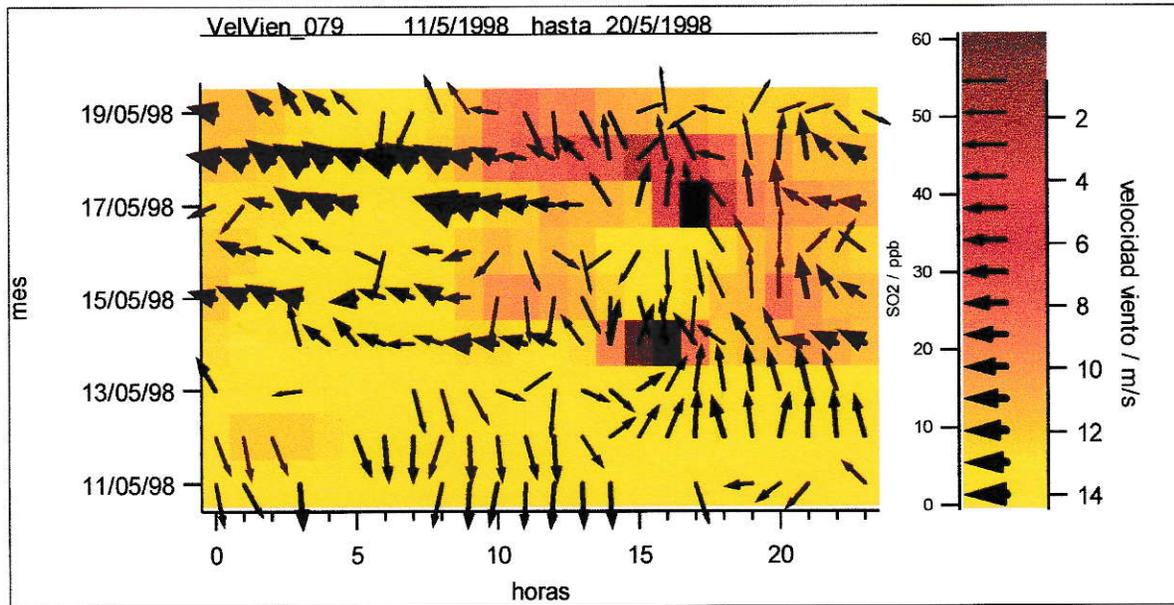


Figura N°64 Velocidad y dirección del viento a 800 m sobre el suelo medidos por el LAPRASS (flechas) y la concentración de SO₂ (color de las celdas) durante el episodio de Mayo del 1998 (elaboración propia).

8.3 Relaciones entre variables durante días de episodios

Las relaciones observadas entre variables meteorológicas y concentraciones de contaminantes no son en general de tipo lineal. Debido a ésto, resulta interesante entender la dinámica de relaciones en el tiempo.

Lo primero que se puede observar de la *Figura N° 65*, son los ciclos diarios, formados en la dirección de las flechas. El aumento de temperatura por la radiación que experimenta la atmósfera durante la mañana es relativamente constante. El máximo de temperatura ocurre dos a tres horas después de ocurrido el máximo de radiación. Después, el decaimiento de la temperatura es similar a un decaimiento exponencial.

Al observar la relación de temperatura y radiación entre los primeros días, existe un aumento de la amplitud de temperaturas, es decir, las mañanas son más frías y las tardes más cálidas. Desde el día 14 de Mayo se observa el comportamiento mostrado en el gráfico en el

que la temperatura en forma generalizada comienza a aumentar hasta el día 17 donde la situación comienza a revertirse.

Cuando la superficie del suelo incrementa su temperatura, en la atmósfera se generan burbujas de aire caliente, las que al ascender generan una mezcla convectiva del aire, hasta llegar a una zona de inversión térmica. Existe un incremento de la altura de capa de mezcla con la temperatura, el cual se muestra en la *Figura N° 66*, a medida que transcurre la mañana (forma cóncava de la curva de la *Figura N° 66*). En cambio el descenso de la capa de mezcla, que ocurre al atardecer es más rápido. Al atardecer el suelo deja de recibir radiación solar y el flujo de calor transferido a la atmósfera se interrumpe, dando comienzo a un proceso inverso, de enfriamiento del aire cerca del suelo,. La capa de mezcla formada durante el día, queda separada de la superficie. En la zona de mezcla superficial se produce en una capa muy reducida, por efecto de la turbulencia creada mecánicamente por el viento, y por el efecto isla térmica, propia de áreas urbanas.

En cuanto al comportamiento entre los días de episodio se observa una disminución de la altura de la capa de mezcla, a medida que aumenta la temperatura, hasta permanecer relativamente constante. Este comportamiento sólo es explicado por la inversión térmica en altura que detiene el crecimiento del volumen de mezcla, a pesar de la mayor temperatura que existe en la superficie. También puede explicarse por el menor volumen de mezcla que está siendo calentada durante el día.

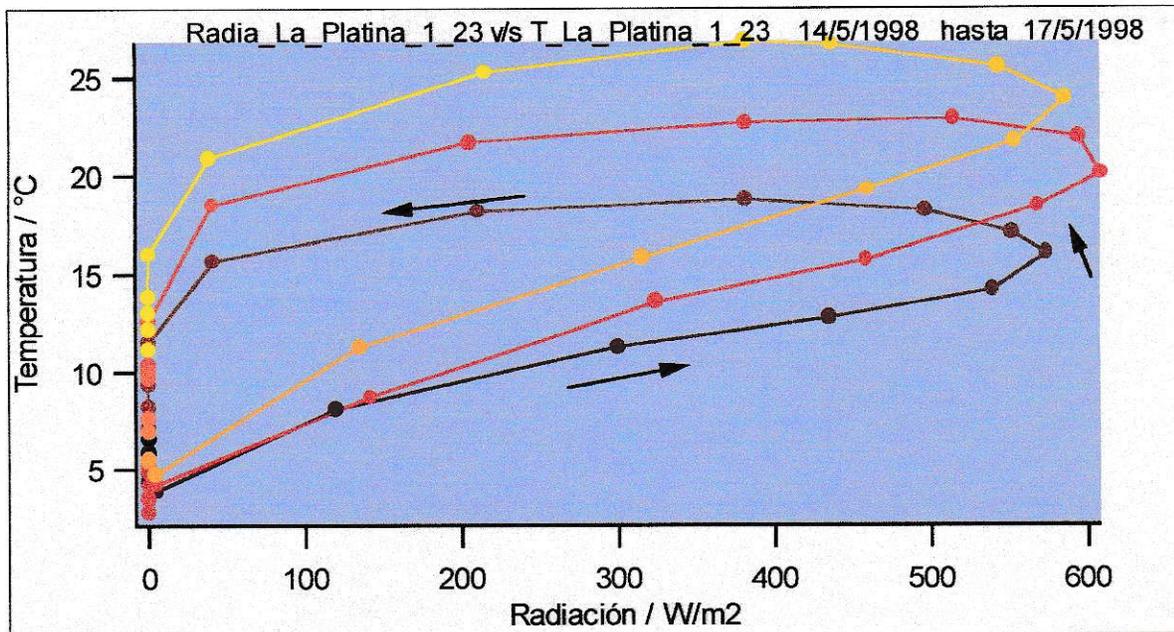


Figura N°65 Relación entre la radiación y la temperatura entre el 14 al 17 de Mayo de 1998. El avance del tiempo está mostrado por el cambio de color que va desde el negro hasta el amarillo, siguiendo el movimiento de las flechas (elaboración propia).

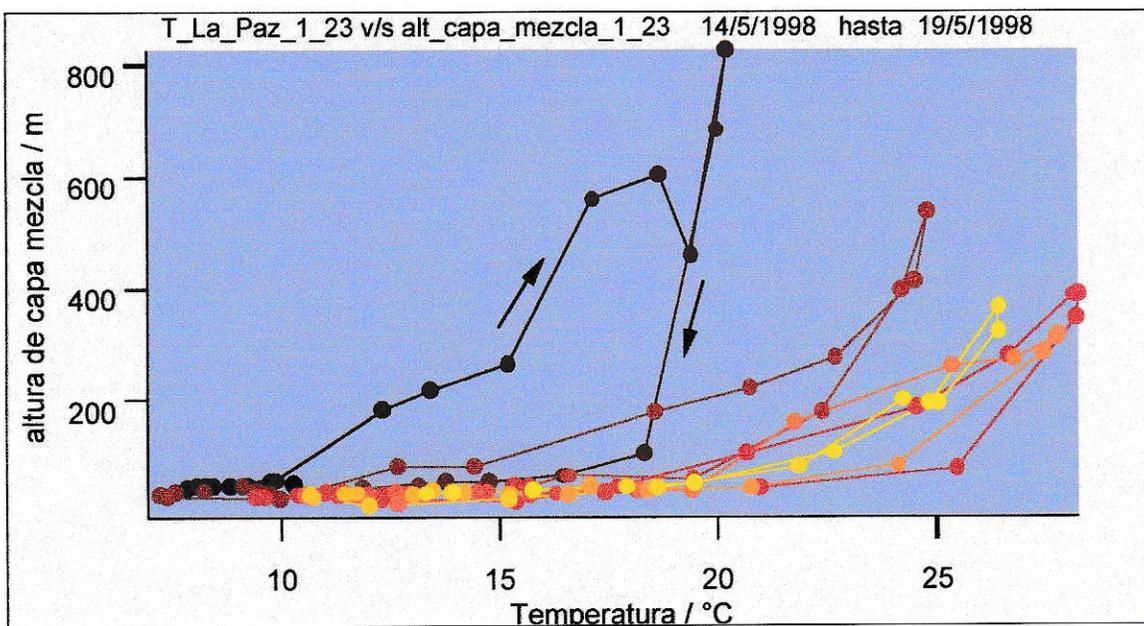


Figura N°66 Relación entre la temperatura y altura de capa de mezcla entre el 14 y 15 de Mayo (elaboración propia).

9 CONCLUSIONES

Los resultados y conclusiones más importantes de este trabajo son los siguientes:

Metodología:

- El programa desarrollado durante el trabajo, ha mostrado ser eficiente en el manejo e integración de la información recolectada por la red de monitoreo de calidad del aire de Santiago y la red meteorológica. Con muy bajo costo en recursos humanos y computacionales, se ha podido describir el comportamiento de los contaminantes y variables meteorológicas ha diferentes escalas, tanto temporales como espaciales. De gran importancia son las nuevas técnicas propuestas para el despliegue de la información.

- Con ellas se ha podido, entre otras, describir el comportamiento de los episodios de SO₂, situación desconocida para Santiago al inicio de la memoria. Otro, será el comportamiento de los NO_x, situación que debe seguirse evaluando, debido al impacto que podrían tener sobre el aerosol secundario en comunas como Pudahuel.

- Para ello, se emplearon nuevas formas gráficas en el análisis de variables ambientales, las que buscan integrar y relacionar la información

- ✓ Imágenes de ciclo diario y ciclo anual.
- ✓ Imágenes de ciclo diario y días.
- ✓ Imágenes temporales y gráficos de velocidad y dirección de vientos con contaminación.
- ✓ Relaciones animadas entre variables.

Elas permiten una mejor interpretación del comportamiento entre contaminantes y variables meteorológicas

- Mediante una metodología muy sencilla y utilizando las herramientas existentes (equipo LAP-RASS), se ha logrado estimar sistemáticamente la altura de capa de mezcla para Santiago, arrojando resultados similares a los obtenidos en observaciones subjetivas realizadas por meteorólogos del CENMA a partir de los perfiles de temperatura.

- Junto a ello, el método permite calcular la altura de capa de mezcla nocturna considerando el efecto de isla térmica de la ciudad.

- Los resultados que entrega el método, describen adecuadamente el comportamiento de los ciclos diarios y ciclos anuales de la altura de capa de mezcla y las condiciones de estabilidad atmosférica, especialmente en días de episodios de vaguada costera (episodios de contaminación en Santiago).

Con los resultados de la altura de capa de mezcla y el viento, se pudo estimar el factor de ventilación, que se utilizó para correlacionarlo con las concentraciones de contaminantes.

Comportamiento de contaminantes:

- El comportamiento del ciclo anual es similar para el CO, PM10, NO₂ y NO, observándose concentraciones máximas en invierno y mínimas en verano, situación asociada al menor factor de ventilación que experimenta la cuenca atmosférica de Santiago en invierno.

- Por el contrario, las máximas concentraciones de O₃ se miden en verano, cuando la radiación solar aumenta, incrementando la descomposición fotoquímica del NO₂, el que genera un precursor del O₃.

- El ciclo diario de CO, PM10, NO, especialmente en invierno, muestra incrementos de la concentración, uno entre las 8:00 hrs. y 9:00 hrs. y otro nocturno, el que varía para cada contaminante.

- En el ciclo diario de O₃, obtenido del promedio de las ocho estaciones, se observa un incremento de sus concentraciones a partir de la mañana, dando un origen a un máximo que ocurre cercano al máximo de radiación solar (entre las 12:00 hrs. y 15:00 hrs), dependiendo la época del año.

- Las curvas típicas de contaminación fotoquímica para el mes de Enero en Santiago, muestran un primer máximo de NO (≈63 ppb) a las 7:00 hrs, tres horas después uno de NO₂ (≈28 ppb) y para finalizar con un máximo de O₃ (≈67 ppb) a las 12:00 hrs (*Figura N°78*).

- Al comparar las concentraciones de O₃ con otras ciudades del mundo (Los Angeles y Caracas), observamos que las concentraciones de este gas son considerablemente mayores, al considerar las altas concentraciones NO o la relación NO₂/NO, de estas ciudades. Esta situación puede estar asociada a los mayores niveles de radiación solar, altas concentraciones de HC y / o un menor factor de ventilación.

- La distribución espacial de las concentraciones de todos los contaminantes primarios medidos por la red, está relacionado con las emisiones, los procesos de remoción, el volumen de mezcla y el viento. El viento en la noche, provoca un transporte de los contaminantes hacia el sector Poniente de la ciudad (Pudahuel) y en el día los contaminantes se desplazan hacia el Nororiente (Las Condes).

- Un factor importante que explica en gran parte la diferencia de concentración de contaminantes entre las estaciones ubicadas al Oriente y del Poniente de la ciudad, es el factor de ventilación. En el día, momento en que la brisa de valle transporta los contaminantes hacia el sector NorOriente, el factor de ventilación es alto, situación que genera bajas concentraciones de contaminantes. En cambio, durante la noche, el factor de ventilación es bajo y el transporte se realiza hacia las estaciones del sector Poniente (especialmente Pudahuel), generando una mayor concentración de contaminantes en esta zona de la ciudad.

- Asociado a lo anterior, en la estación de Pudahuel se observan condiciones que favorecen la formación de aerosol secundario. Ésto se explica por la notable disminución nocturna que experimenta el NO₂ en el sector Poniente, el que es un precursor de material particulado. Junto a ello, se observa que concentraciones por sobre los 200 ug/m³ de PM10 en Pudahuel, están asociadas con la disminución de las concentraciones de NO₂ y NO, situación que puede ser asociada al efecto que tendría la superficie de las partículas en catalizar la remoción en fase heterogénea de los NO_x, para formar aerosol constituido por nitratos.

- Particularmente para caso de O₃, su distribución espacial durante el día obedece principalmente a la razón NO₂/NO, que es baja en el centro y que se incrementa a medida nos movemos hacia la periferia de la ciudad. Situación descrita en el trabajo y que presumiblemente está ligada a las mayores tasas de emisión de NO en el centro de

Santiago, las que consumen al O₃. Sin embargo y producto de la brisa de valle que existe durante el día, las mayores concentraciones se desplazan hacia el N-E de Santiago.

- Las más altas concentraciones nocturnas de contaminantes, especialmente de PM10 medidos en Pudahuel, están relacionados a flujos nocturnos de descenso superiores a 1,5 m/s medidos en las estaciones precordilleranas (Las Condes y La Florida).

- Los episodios de SO₂ se caracterizan por ser esporádicos, ocurrir en horas de máxima ventilación, abarcar a toda la ciudad, sus concentraciones no superan la norma y están asociados a días de alta insolación (situación que lo relaciona en invierno, a los episodios Tipo A).

- Los episodios de SO₂ se producen cuando:

- ✓ En horas previas al aumento del SO₂ en Santiago, se observan vientos en altura del S-E (1.300 m.s.n.m aproximadamente).

- ✓ Al momento de ocurrir el episodio, existe una capa de mezcla relativamente alta (800 m.s.n.m. aproximadamente), situación que generalmente ocurre en horas de la tarde, incorporando el SO₂ a la zona superficial de la cuenca atmosférica de Santiago.

- ✓ Por último, la brisa de valle transporta al SO₂ desde el sector S-W, hacia el sector N-E de la ciudad.

Esto hace suponer que el SO₂ es transportado desde la fundición de Cobre de Caletones (ubicada 34°05'S, 70°27'W, a 2400 m.s.n.m. en la cordillera de la VI Región) y es incorporado desde capas troposféricas en altura, hacia la superficie de Santiago.

- Junto con el aumento del SO₂, se observan incrementos simultáneos de PM10, los que probablemente estarían constituidos en su mayoría por sulfatos y serían directamente emitidos por la fundición de Cobre de Caletones o producto de la transformación del SO₂ en aerosol, durante su viaje. Esta conclusión está de acuerdo con los resultados obtenidos por Artaxo, 1998, dónde describe similares concentraciones de azufre en el material particulado fino, en toda la ciudad de Santiago, incluso en zonas remotas como Talagante y Peldehue (Artaxo, 1998) y que están asociadas a las emisiones de las fundiciones de Cobre.

- Las evidencias teóricas y empíricas muestran que aumentos de SO₂, están asociados con incrementos en la relación de NO₂ / NO, O₃ y de material particulado secundario (sulfatos y nitratos), especialmente en días de episodio, situación que debe ser analizada por otros métodos y cuantificada.

- Las tendencias durante el período analizado (entre 1997 y 1999), muestran una disminución de las concentraciones máximas de CO y PM10, durante el período invernal. Las concentraciones descendieron en un 35% para el CO y de un 22% para el PM10, para el máximo de las 9:00 hrs.

- Para el O₃ no se observa una tendencia clara que afirme una disminución en las concentraciones durante el período analizado. Se recomienda buscar la zona de máximo impacto de O₃, hacia al N-E de la ciudad, de manera de poder verificar el efecto de las medidas que tiendan a disminuir este contaminante secundario.

10 GLOSARIO

Atractor: punto de equilibrio hacia el cual tiende la evolución de una función.

Agregación: agrupación de partes homogéneas, formando un todo, lo que permite que las partículas aumenten su tamaño a partir de aerosol de menor diámetro.

Coagulación : fenómeno por el cual un líquido orgánico o solución coloidal, precipita en una masa sólida o coágulo.

Condensación : paso de un vapor del estado gaseoso al estado líquido. Ésto, generalmente ocurre en una población de partículas, permitiendo que las partículas aumenten su diámetro.

Contaminación: la presencia en el ambiente de sustancias, elementos energía o combinación de ellos, en concentraciones o permanencias superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994).

Contaminante: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994).

Dorsal: Área de altas presiones y temperaturas mayores, en la tropósfera media (500 hPa), normalmente asociado a flujo del SW en su parte delantera.

Factor de Ventilación: También llamado índice de contaminación, se denomina al producto entre la altura de capa de mezcla (H) y el viento (v). Este factor surge en modelos tipo caja, euleriano de dimensión cero, el que es utilizado para hacer primeras estimaciones de concentración de un contaminante.

$$\langle c \rangle = \frac{Q}{A \times v \times H}$$

Donde c es la concentración del contaminante, Q la tasa de emisión y A es el ancho de la ciudad en dirección perpendicular a la dirección del viento.

Inversión térmica: fenómeno térmico, que se reconoce como un aumento de la temperatura del aire con la altura. Esto impide los movimientos verticales de aire, generando una situación de estabilidad atmosférica.

Inversión térmica de subsidencia: Fenómeno atmosférico que se origina por el predominio de altas presiones, lo que genera una inversión térmica en altura (entre los 700 y 1.000 msnm., aproximadamente). Esta fenómeno impide el ascenso del aire y por consiguiente, la dispersión vertical de contaminantes

Norma Primaria de Calidad Ambiental: aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994).

Proceso adiabático: proceso termodinámico en un medio en la cual no existe flujo de calor con el ambiente circundante.

Subsidencia: movimiento descendente del aire generalmente asociado a regiones donde existe un centro de alta presión en superficie. La subsidencia va acompañada por un calentamiento adiabático producido por el aumento de presión del aire que desciende.

Tiempo de recambio: Tiempo medio de permanencia de un contaminante.

Zona Latente: aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994).

Zona Saturada: aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, 1994).

11 BIBLIOGRAFÍA

- Anderson L. G., Gates P. M., Nold C. R.; (1989); "Mechanism of Atmospheric Oxidation of Sulfur dioxide by hydroxyl radicals" American Chemical Society
- Andrews J. E., Brimblecombe P., Jickells T.D and Liss P.S; (1996); "An introduction to Environment Chemistry"; Blackwell Science.
- Advanced Pollution Instrumentation (API) (1996); "Model 200A Nitrogen Oxides Analyzer"; Instruction manual, San Diego California, N° 01360-C 6/13/96.
- API (1996); "Model 200A Nitrogen Oxides Analyzer"; Instruction manual, San Diego California, N° 01360-C 06/13/96.
- API (1996); "Model 100A Sulfur Dioxide Analyzer"; Instruction manual, San Diego California, N° 014472-REV.H 04/11/96.
- API (1996); "Model 300 CO Analyzer"; Instruction manual, San Diego California, N° 020072-REV.H 04/11/96.
- API (1996); "Model 400 O₃ Analyzer"; Instruction manual, San Diego California, N° 00630G 04/11/96.
- Atkinson R, Lloyd AC; (1983); J Phys Chem Ref Data 11:179
- Attilio Bisio, Sharon Boots; (1995); "Energy technology and the environment"; Volume 1; John Wiley & Sons, Inc.1995.
- Barbara J. Finlayson - Pitts and James N. Pitts Jr.; "Tropospheric Air Pollution: Ozone, Airborne Toxic, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Particles.
- Berresheim, H., Wine, P.H., and Davis, D.D. (1995) Sulfur in the atmosphere, in Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere, dited by H.B. Singh. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 251-307.
- Boyles Ryan, Tillerson, Clint y South, Joseph. (1996) "Air Quality Meteorology Curriculum for Online Tutorial", the Industrial Extension Service, North Carolina State University.
- Calvert J.G. y McQuigg, R.D., (1975) " The computer Simulation of de Rates and Mechanism of Photochemical Smog Formation", Inter, J, Chem., Kinet., Symposium 1, 113-154.
- Calvert , J.R., SU, F., Botteheim, J.W y Strauss, O.P.; (1978); "Mechanism of the Homogeneous Oxidation of Sulfur Dioxide in the Troposphere", Atmos. Environ., 12, 197 – 226.
- Campos, Cecilia; (1991); "Influencia de algunos iones inorgánicos en los aerosoles atmosféricos de la ciudad de Santiago, sobre y bajo la capa de inversión térmica". Tesis Químico. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.
- CENMA - CONAMA (1999); Proyecto de meteorología y calidad de aire, "Análisis del Comportamiento diferenciado de las condiciones de aire de la cuenca de Santiago, asociado a diferentes tipos de episodio" Santiago Chile, Noviembre 1999.
- CENMA – CONAMA (1999); "Proyecto Meteorología y Calidad del Aire" Anuario. Agosto de 1999.
- CENMA (2000); "Red de Estaciones Meteorológicas y Perfilador Acústico Lap-Rass" Informe hecho a CONAMA-RM, del Proyecto de Meteorología y Calidad del Aire de CENMA para el año 2000.
- CENMA (2001); elaborados en CENMA a partir del inventario de emisiones del año 1997 de CONAMA y corregido para el año 1998.
- Chameides W. L., Lindsay R.W., Richardson J., Kiang C. S.; (1998) The Role of Biogenic Hydrocarbons in Urban Photochemical Smog. Atlanta as a Case Study"; Science, Vol 241 p 1473 Sep de 1998.
- Colberck I; (1995); "Particle Emission from Outdoor and Indoor Sources" ; Airbone Particulate Matter; Springer, p 33.
- CONAMA (1998) Comisión Nacional del Medio Ambiente "Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana"; Santiago ,Marzo de 1998.

-
- CONAMA (1996); "Mejoramiento de la información requerida para el control de la contaminación atmosférica de la Región Metropolitana"; Junio de 1996
 - CORFO (1978); "Programa para el control de la Contaminación Atmosférica en el Área Metropolitana", INTEC-CHILE/SNS, Santiago, Chile.
 - Cullis C. F., Hirschler M. M.; (1980) "Atmospheric Sulphur: Natural and man-made sources" Atmos. Environ 14:1263, 1980.
 - De la Vega V., Fuentes H., Ortiz J. Y Prendez M. (1987) "Balance de masa en aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile". Bol. Soc. Chil. Quim. 32, 187-197, 1987.
 - De la Vega, Viviana (1986); "Contaminación por iones inorgánicos en los Aerosoles atmosféricos del Área Metropolitana". Tesis de Licenciatura en Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile, 1986.
 - Escudero J, Sandoval H., Ulriksen P., (1981); "Estudio de impuestos a la emisión de contaminantes de aire y agua en la Región Metropolitana"; J. Escudero O., H. Sandoval L., P. Ulriksen U. y Otros.
 - Gallardo, Laura (1997); "Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos". Apuntes de Clase, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
 - Gallardo L., Olivares G. y Aguayo A. (1999) "Application of a regional-scale model over the central part of Chile" December 1999
 - Glasson V.A., (1971). "In Chemical Reaction in Urban Atmospheres", (C. Tuesday Ed.) Elsevier, Amsterdam, p. 59.
 - Fernández, Marcelo (1999) "Desarrollo y Aplicación de una metodología para estimar emisiones en el gran Santiago: escenario base 1997"; Tesis Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, Santiago Chile 1999.
 - Heicklen J., Westberg, K. Y Cohen, N., (1971) Capítulo en "Chemical Reaction in Urban Atmosphere", C. Tuesday, Ed., Elsevier, Amsterdam, p. 55.
 - Holzworth, G. C. (1972). Mixing Heights, Wind Speeds, Potencial for Urban Air Pollution Throughout the Contiguous United States. AP-101. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
 - Iasa-Fac Cs. Fís y Mat. U de Chile (1981); "Estudio de impuestos a la emisión de contaminantes de aire y agua en la Región Metropolitana"; J. Escudero O., H. Sandoval L., P. Ulriksen U. y Otros.
 - Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (1995): Climate Change: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
 - Jones CI, Seinfeld JH , 1983, Atmos Environ 17:2370
 - Kadowaki S. (1986) "On the nature of atmospheric oxidation processes of SO₂ to sulfate and NO₂ to nitrate on the basis of journal variations of sulfate, nitrate, and other pollutant in a urban área". Environmental Science & Technol 20, 1249-1253, 1986.
 - Kan, C.S., McQuigg, D., Whitbeck, M. R. Y Calvert, J.C., (1979). "Kinetic Flash Spectroscopic Study of the CH₃O₂- CH₃O₂ and CH₃O₂-SO₂ Reactions", Inter. J. Chem. Kinet., 11, 921-933.
 - Kiehl, J.T., and Rodhe, H. (1995) Modeling geographical and seasonal forcing due to aerosols, in Aerosol Forcing of Climate, edited by R.J. Charlson and J. Heintzenberg. Wiley, New York, pp. 281-296.
 - Kouimtzis, T. , Samara, C. (1995) "Airbone Particulate Matter"; The Handbook of Environmental Chemistry, Springer, Germany.
 - Ministerio de Salud de la República de Chile, Resolución 1215/1978 "Norma de Calidad de Aire " 1978 y Decreto Supremo del Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República "Establece la Norma Primaria para Material Particulado Respirable PM10".
 - Merino, Manuel (1999); Análisis de condiciones metereológicas asociadas a episodios de alta contaminación atmosférica en la cuenca de Santiago, en el período de Otoño-Invierno de 1999. Proyecto de Meteorología y Calidad del Aire, CENMA 1999.
-

-
- Ministerio General de la Presidencia, Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente, Artículos 32 y 85, publicada en el Diario Oficial del 9 de Marzo de 1994.
 - Moller, D., (1980). "Kinetic Model of Atmospheric SO₂ Oxidation based on published data" *Atm. Envir.*, 14, 1067 – 1076.
 - National Research Council (1991) *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*. National Academy Press, Washington, DC.
 - Olaeta, Ignacio (1997)- SESMA "Medición de la Calidad del Aire en la Región Metropolitana" Santiago de Chile 1997.
 - Oleata, Ignacio (1997) "Estadística de Material Particulado en Suspensión y Gases" recopilación de datos de la red automática MACAM2-RM, SESMA, año 1997.
 - Oleata, Ignacio (1998) "Estadística de Material Particulado en Suspensión y Gases" recopilación de datos de la red automática MACAM2-RM, SESMA, año 1998.
 - Oleata, Ignacio (1999) "Estadística de Material Particulado en Suspensión y Gases" recopilación de datos de la red automática MACAM2-RM, SESMA, año 1999.
 - Peter V. Hobbs; (1995); "Basic Physical Chemistry for the atmospheric sciences"; Cambridge University Press 1995.
 - Prendez M., Ortiz J. And Zolezzi S. Informe final proyecto Fondecyt 0167/88, 1991.
 - Radian International, (1997); "The LAP-3000" Operation and Maitenance Manual; Radian International Electronics Division STI, N° 80018201 Revision B January 1997.
 - Rogge WF, Mazurek MA, Hildeman LM, Cass Gr, Simoneit BRT (1993) *Atmos Environment* 27:1309.
 - Rojas C., Artaxo P., and Van Grieken R. "Aerosols in Santiago de Chile: A study using receptor modeling with X-ray fluorescence and single particle analysis". *Atmospheric Environ.* 24B, 227-248, 1990.
 - Russell AG, McRae Gj, Cass GR, (1985) *Atmos Environ* 18:893.
 - Rutllant, José y Garreud, René; 1995; "Meteorological air pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment* 34: 223-244.
 - Samara, Constantini (1995); *Analysis of Organic Particulate Matter ; Airbone Particulate Matter, The Handbook of Environmental Chemistry; Springer-Vrlag Berlin Heidelberg* 1995.
 - Sandoval , Hugo (1985); "Estudio de caracterizaciones físicas y químicas de partículas en supensión en la Región Metropolitana". SESMA, desarrollado por la Universidad de Chile.
 - Sandoval, Hugo L., Prendez Margarita, Ulriksen Pablo ; (1993); "Contaminación atmosférica de Santiago", Universidad de Chile, Santiago de Chile.
 - Sandoval, Hugo y Toro P. (1990) "Estudio de evaluación de sulfatos en aerosoles de Santiago" Intendencia Región Metropolitana. Desarrollado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile 1989-1990.
 - Sanhueza y Lissi (1981); "Aspectos cinéticos de la formación del smog fotoquímico"; *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, octubre 1981.
 - Sanhueza Eugenio y Lissi Eduardo A.; (1996); "Radiación y fotoprocesos atmosféricos"; Editorial Universitaria de Santiago, octubre.
 - Sarabia, Julio; (2000): "Análisis de condiciones meteorológicas prefrontales asociadas a malas condiciones de ventilación en la cuenca de Santiago entre los años 1997,1998 y 1999" Postulación al título de Meteorólogo, Universidad de Valparaíso, Facultad de Ciencias, Instituto de Matemática y Física, Carrera de Meteorología ,Abril del 2000
 - Seinfeld J. H., Pandis Spyros. N.; (1997); "Atmospheric chemistry and physics"; John Wiley & Sons, Inc, New York.
 - SESMA (1999) "Evolución de la Contaminación Atmosférica Región Metropolitana", Página en Internet del Servicio Nacional del Medio Ambiente "www.sesma.cl".
-

-
- Schlesinger RB, Gurman L G y Chen L C (1980); "The production and characterization of a transition metal (Fe(III))-S(IV) aerosol"; Atmospheric Environment, Vol. 14, pp 1279.
 - Schroeder , W.H. y Urone, P., (1978); Isolation and Identification of Nitrosonium Hydrogen Sulfate (NOH SO₄) as a Photochemical Reaction Product in Air Containing Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide", Environ. Sci. Technol., 12, 545 - 549.
 - Shmauss A (1920) The chemistry of fog, cloud and rain. Umschau 24:61-63
 - Smith, J.P. y Urone, P.; (1974); "Static Studies of Sulfur Dioxide Reactions: Effects of NO₂, C₂H₆ and H₂O", Environ. Sci. Technol., 8, 742-746.
 - Spyros N. Pandis et al, (1995); "In Situ Particle Formation / Reaction Mechanisms"; Airbone Particulate Matter; Springer, p 33.
 - Tornevik, H., (1993); Computer Aided Air Quality Management System. An integrated Concept including Mapping, Monitoring and Modeling in Urban Areas.- National Workshop on Urban Air Quality Monitoring and Modelling. Bangalore, India.
 - Tuazon EC, Atkinson R, Plum CN, Winer AM, Pitts Jr JN (1983) Geophys Res Lett 10:953
 - The U.K. Department of Environment, (1993) "Urban air quality in the United Kingdom". First Report of Quality of Urban Air Review Group, London.
 - Universidad de Chile – Servicio de Salud del Ambiente, Región Metropolitana (1985), "Estudio de características físicas y químicas de partículas totales en suspensión en la Región Metropolitana". Informe final, 1985.
 - Ulriksen, Pablo; (1993) "Mediciones de calidad de aire en el Fundo La Higuera, Talagante"; Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago Chile.
 - Ulriksen, Pablo, Merino Thayer, Araya Marcelo, Alvarado, Gerardo (1997); "Calidad de Aire"; Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, CENMA para la CONAMA ,1997 [reporte anual disponible en CEMA].
 - Ulriksen, Pablo, Merino Thayer, Araya Marcelo, Alvarado, Gerardo (1998); "Calidad de Aire"; Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, CENMA para la CONAMA ,1998 [reporte anual disponible en CEMA].
 - Ulriksen, Pablo, Merino Thayer, Araya Marcelo, Alvarado, Gerardo (1999); "Calidad de Aire"; Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, CENMA para la CONAMA ,1999 [reporte anual disponible en CEMA].
 - Ulriksen, Pablo; (2000); " Diálogo sobre estado actual de las investigaciones de contaminación atmosférica en Santiago"; Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, Santiago de Chile, 2000.
 - Ulriksen, Pablo, Alvarado, Gerardo, Venegas Patricio (2000). "Mediciones Experimentales de PM10 con TEOM en la Comuna de Pudahuel". Proyecto Meteorología y Calidad del Aire CENMA realizado para CONAMA, enero del 2000, Santiago, Chile [reporte anual disponible en CEMA].
 - Warnatz J., Maas U., Dible R. W. Combustion; (1996); "Physical Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation"; Editorial Springer
 - Weinstok, Bernanard , (1969) "Carbon Monoxide: Residence Time in the Atmosphere", Science, Vol 66 pp 224, 10 October de 1969

12 ANEXO A

MACAM2, red para la Medición de Calidad del Aire en la Región Metropolitana.

(Olaeta, 1997)

Cada estación de la red MACAM2 esta constituida por un container adaptado de aluminio aislado térmicamente, el que alberga y protege a los equipos analizadores. En el techo del container están ubicadas 2 aberturas, una para gases y otra para partículas en suspensión fracción PM10. Junto a estos, un mástil plegable a 10 metros de altura entrega soporte a los instrumentos meteorológicos de superficie.

El diseño del Sistema MACAM2-RM se ajustó a la normativa chilena existente o en su defecto a normativa de la US EPA.

Esencial para un adecuado funcionamiento de los equipos, es el control de la temperatura interna (aire acondicionado) y de un suministro de energía eléctrica (UPS) y tierra de buena calidad (malla), para asegurar el adecuado funcionamiento de los analizadores y equipos auxiliares.

En el interior de cada container, dos (2) racks los que soportan la mayoría de los equipos.

Materiales aprobados (teflón, acero inoxidable, vidrio pyrex) son utilizados en la conducción del aire exterior muestreado hasta los puntos de análisis. Diseños especiales, permiten al aire entrante del exterior y al aire analizado, ser expulsados al exterior, no perturbando el control interno de temperatura de la estación.

En cada estación, un computador industrial (data logger) colecta y almacena los datos medidos por los analizadores.

El control de calidad de las mediciones esta basado fundamentalmente, en una calibración para dos puntos por cada analizador, efectuadas diariamente en la madrugada en forma automática. Las atmósferas patrones son obtenidas mediante la dilución dinámica de gases patrones norteamericanos contenidos en cilindros especiales. Esta metodología esta implementada para la medición de CO, SO₂ y NO/NO₂. En el caso del O₃ es utilizado un generador muy estable de ozono, el que es calibrado contra un fotómetro de terreno. A su vez este fotómetro de terreno es calibrado a intervalos regulares mediante un fotómetro guardado en el Laboratorio de SESMA.

TEOM (Tapared Element Oscillating Microbalance), analizador de PM10

El equipo TEOM básicamente está formado por un cabezal de entrada, una unidad sensora, una unidad de control y una bomba de aspiración. El principio de funcionamiento es el siguiente: a través del cabezal se aspira una muestra de aire con partículas menores al punto de corte de éste, a razón de 16.67 lt/min., a la salida del cabezal este flujo es separado en un flujo principal (1, 2 o 3 lt/min.) que alimenta al sensor y un flujo auxiliar que generalmente es reenviado al exterior o puede ser utilizado en equipos adicionales para la caracterización de partículas. El flujo principal de aire antes de ingresar a la unidad sensora tiene una microbalanza basada en un tubo delgado, fijo en un extremo, que es mantenido en vibración. Un filtro instalado en el extremo libre del tubo que recoge el material particulado de la corriente de aire que pasa a través de él. La frecuencia de vibración del tubo va disminuyendo a medida que se deposita la masa en el filtro. El aumento de masa en una unidad de tiempo (por ejemplo 10 min.) dividido por el flujo de operación permite calcular la concentración de PM10 en ese intervalo de tiempo (por ejemplo, 5 min., 1 h y 24 horas), con capacidad para varios días de mediciones. Dependiendo del tamaños de partículas a monitorear se

define el cabezal de entrada, ya sea menores a 10 micrones (MP10) o menores a 2,5 micrones (MP2.5).

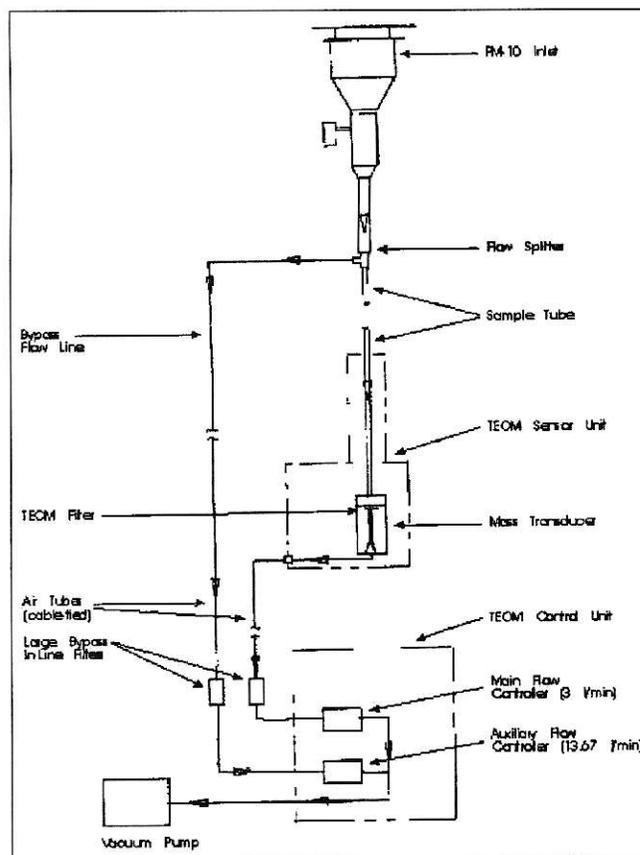


Figura N°67 Esquema del equipo TEOM ocupado para el análisis de PM10.

Regulación aprobada:

- USEPA PM10 equivalente EQPM-1090-079.
- PM-2.5 medidor dentro del contexto de la USEPA correlación aceptable como monitor continuo (40 CFR 58)
- Unión Europea PM-10 reconocido dentro del contexto de Europa Norma EN12341
- EPA Alemana aprobado como un método equivalente al monitor TSP

Tabla N° 15 Especificaciones del equipo teom

Limite de mínimo de detección:	0.01 µg
Precisión para promedio de 10 minutos de datos:	± 5.0 µg / m ³
Precisión para promedio de 1 hora de datos:	± 1.5 µg / m ³

No requiere calibración.

API Series 300, analizador de CO (Api, 1996).

Tanto la detección como la medición del CO en el Model 300, está basada en la absorción molecular del CO en el Infra Rojo (IR) no dispersivo, a una longitud de onda cercana a los 4.7 micrones, la que es generada a través de energía calórica. Esta luz es pasada a través de un Filtro Gas Rotatorio (FGR), el que alterna el paso de una celda llenada con N₂ (la Celda de Medición) y una celda llenada con una mezcla CO / N₂ (la Celda de Referencia). La alternación ocurre a una tasa de 30 ciclos/segundo, provocando pulsos luminosos de Medición y Referencia. Durante el pulso de Referencia, el CO dentro de FGR quita toda la Energía IR, a la longitud de onda en que absorbe el CO. Esto causa que el haz de luz no sea afectado por el CO presente en la Celda de Medición. En cambio durante el pulso de Medición, el N₂ presente en la muestra no afecta el haz de luz el cual puede ser absorbido por algún CO presente en la muestra. Sobre el FGR, se incorpora un cortador óptico, el cual sobrepone una modulación sobre la luz IR de 360 ciclos/segundo de luz y oscuridad. Esta alta frecuencia de modulación está incorporada para maximizar el desempeño del detector (señal-ruido).

Al salir del FGR, la radiación IR entra al multi-pasos de la Celda de Medición. La Celda de Medición usa un plegado óptico, el que genera una absorción equivalente a un paso de dieciséis metros largo, logrando un máximo de sensibilidad.

Después de pasar por la Celda de Medición, el haz de luz atraviesa un filtro el que selecciona la longitud de onda que interesa para la cuantificación del CO.

Finalmente el haz golpea el detector foto conductor, el que esta termoelectricamente enfriado en estado sólido.

El detector convierte la luz en señal eléctrica, preamplificandola.

Fuera del detector la señal eléctrica es demodulada en dos voltajes de corriente continua (DC), uno de CO Medición y otro CO de Referencia. Estos voltajes son proporcionales a la intensidad de luz generada durante el Pulso de Medida y el Pulso de Referencia, respectivamente.

Posteriormente la señal es calculada en la Unidad de Procesamiento Central (CPU) del equipo, para su posterior visualización y almacenamiento.

Adicionalmente posee un subsistema que permite chequear el equipo automáticamente a partir de un sistema de cero / span (Inglés IZS).

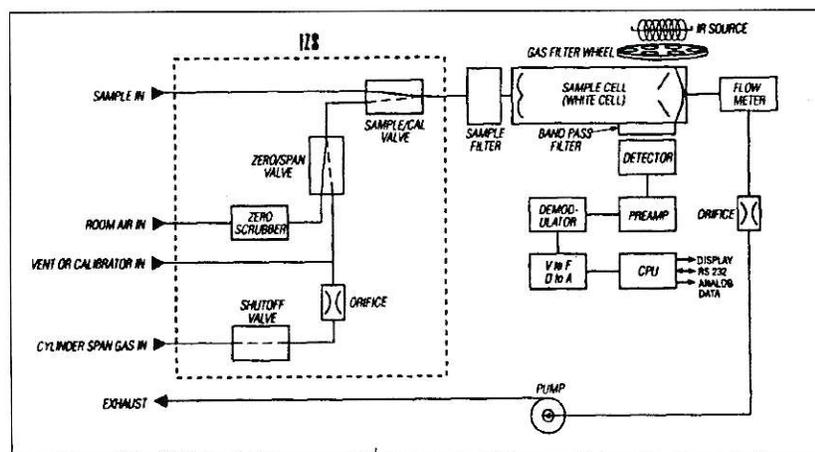


Figura N°68 Esquema del equipo API Series 300 ocupado para el análisis de CO (fuente: Api, 1996).

Regulación aprobada:

Método de referencia US EPA RFCA 1093-093

Especificaciones:

Tabla N° 16 Especificaciones técnicas para el monitor de CO (fuente: Api, 1996).

Rango de medición	1 ppm a 1000 ppm
Unidades de medida	ppm, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mg/m^3
Ruido cero*	0.025 ppm
Ruido span*	0.5% de lectura (sobre 5 ppm)
Límite de Detección*	0.05 ppm
Linealidad	1 % escala completa
Precisión	0.5 % de lectura*
Tasa de flujo de muestreo	800 cc/min \pm 10 %
Rango de temperatura	5-40°C***

Definido por la US EPA * 15-35°C por US EPA monitor.*

API Modelo 100A, analizador de SO₂

(Api, 1996).

La medición del SO₂ está basada en la medida de la fluorescencia del SO₂, causada por la absorción de energía UV. El SO₂ absorbe energía entre los 190 nm y los 230 nm, zona relativamente libre de interferencia. Las interferencias son causadas por los compuesto aromáticos polinucleares (Inglés PNA) y son reducidas por un "kicher" la que remueve los PNA selectivamente a través de una membrana.

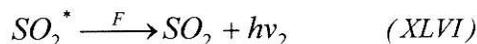
La lámpara UV emite radiación ultravioleta con una longitud de onda de 214 nm, excitando a las moléculas de SO₂, produciendo fluorescencia y que es medido por un PMT con un filtro UV secundario. La ecuación que describe la reacción es la siguiente:



La intensidad de luz ultravioleta absorbida por el sistema (I_a) está dada según la ley de Beer por:

$$I_a = I_o * (10^{-\epsilon * l * [SO_2]}) \quad (XLV)$$

Donde I_o es la intensidad de luz ultravioleta emitida por la lámpara, ϵ el coeficiente de extinción molar del SO₂, l el paso de luz, y $[SO_2]$ la concentración de SO₂. El SO₂^{*} excitado decae emitiendo una fluorescencia característica:



Asumiendo que la potencia de radiación fluorescente F , es proporcional a la potencia del haz radiante absorbido por el sistema y sustituyéndola con la ecuación X, para relacionar F con la concentración de SO₂, nos queda:

$$F = K' * I_o * (1 - 10^{-\epsilon * l * [SO_2]}) \quad (XLVII)$$

Donde K' depende de la eficiencia cuántica del proceso de fluorescencia.

Siempre que $2.303 * \epsilon * l * [SO_2]$ sean menores a 0.05 y el background sea aire, la ecuación la podemos reducir a:

$$F = K' * [SO_2] \quad (XLVIII)$$

Quedando la radiación de fluorescencia que impacta sobre el PMT, proporcional a la concentración de SO₂.

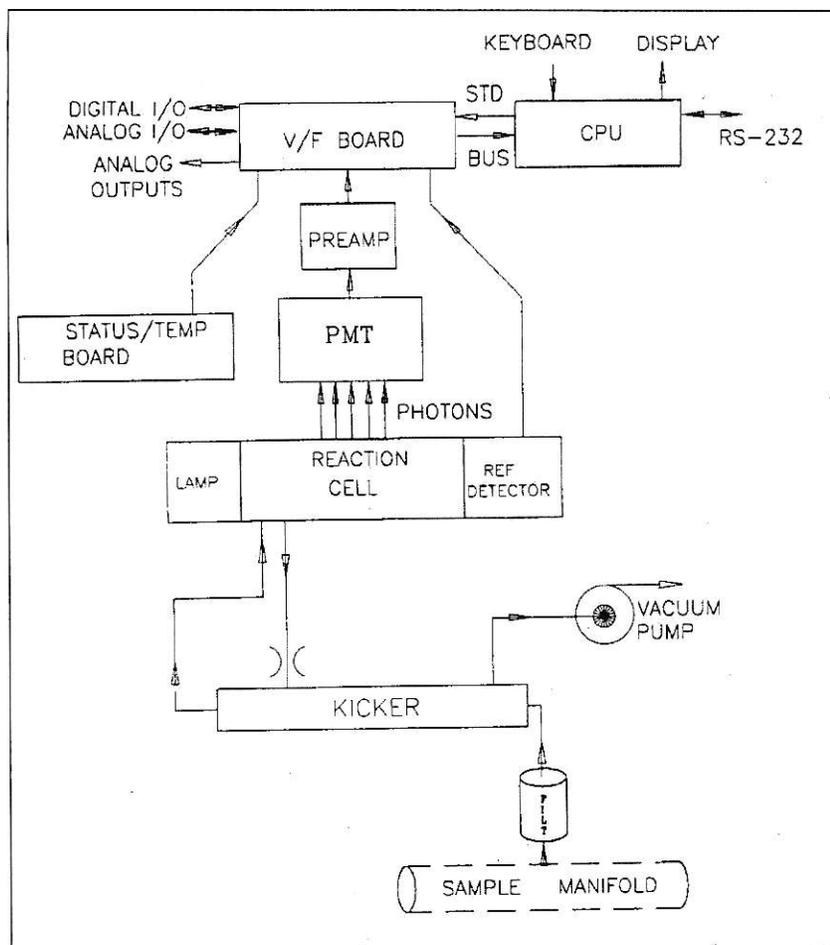


Figura N°69 Esquema del equipo API Series 100A ocupado para el análisis de SO₂ (fuente: Api, 1996).

Regulación aprobada:

El Modelo 100A SO₂, está designado como Método de Referencia Número EQSA-0495-100 en 40 CFR, Parte 53, cuando es operado bajo la siguientes condiciones:

- Rango: entre los 50 ppb y los 1000 ppb.
- Temperatura ambiental entre los 5 y 40 °C.
- Rango en la línea de voltaje de 105-125 VAC, 60 Hz.
- Con 5-micrón elemento filtro TFE instalado en el ensamblado del filtro interno.
- Flujo de muestreo de 650±65 cc/min.
- Bomba de vacío (interna o externa) de 14'' Hg Abs presión.
- Condiciones de Software:
 - Span dinámico: OFF
 - Cero dinámico: ON o OFF
 - Auto calibración: ON o OFF

- Rango Dual: ON o OFF
- Autorango: ON o OFF
- Compensación temp/presión: ON

Especificaciones:

Tabla N° 17 Especificaciones técnicas para el monitor de SO₂ (fuente: Api, 1996).

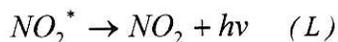
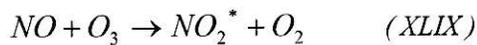
Rango de medición:	50 ppb a 20 000 ppb
Unidades de medida:	ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³
Ruido cero*:	0.2 ppb
Ruido span*:	< 0.5% de lectura (sobre 50 ppb)
Limite de Detección*:	0.4 ppb
Linealidad :	1 % escala completa
Precisión*:	0.5 % de lectura
Tasa de flujo de muestreo:	700 cc/min ± 10 %
Rango de temperatura:	5-40°C

**definido por la US EPA.*

API Series 200A, analizador por quimioluminiscencia NO/NO₂/NO_x

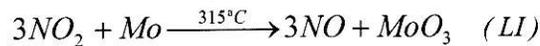
(fuente: Api, 1996).

Este equipo está diseñado para medir la concentración de NO, NO_x y calcular la concentración de NO₂. El instrumento mide la intensidad de la quimioluminiscencia producida en la reacción en fase homogénea del NO con O₃, como se muestra en la siguiente ecuación:



Producto de la reacción del NO con el O₃ se genera una molécula de NO₂^{*} electrónicamente excitada como se observa en la reacción superior. La molécula de NO₂^{*}, libera el exceso de energía mediante la emisión de un fotón. Por lo tanto, la concentración de NO será directamente proporcional a la intensidad de radiación luminosa producida, la que será cuantificada por el tubo fotomultiplicador (PMT).

Una parte del flujo es desviado a través del convertidor que contiene molibdeno caliente, el cual reduce el NO₂ presente a NO, mediante la siguiente reacción:



Ahora el analizador mide la concentración total de NO_x (suma de NO y NO₂). La concentración de NO₂ es calculada mediante la diferencia entre el NO_x y el NO, en la CPU del equipo. Posteriormente los datos de los tres gases son almacenados por el computador en distintos promedios de distinta duración.

El software usa un filtro que se adapta rápidamente a los cambios de concentración. El equipo posee un algoritmo que detecta los cambios de concentración de NO y NO_x en ambos canales. Cuando se detecta cambios en la concentración, el software cambia rápidamente los filtros. Los filtros son utilizados para minimizar el error introducido por el tiempo de retraso entre los canales de NO_x y NO; ésto asegura las medidas de NO₂. Cuando la tasa de cambio decrece, el filtro es alargado para proveer un buena razón de señal/ruido.

Adicionalmente posee un subsistema que permite chequear el equipo automáticamente a partir de un sistema de cero / span (Inglés IZS), además incluye un controlador de temperatura del tubo de permeación y un limpiador de aire cero.

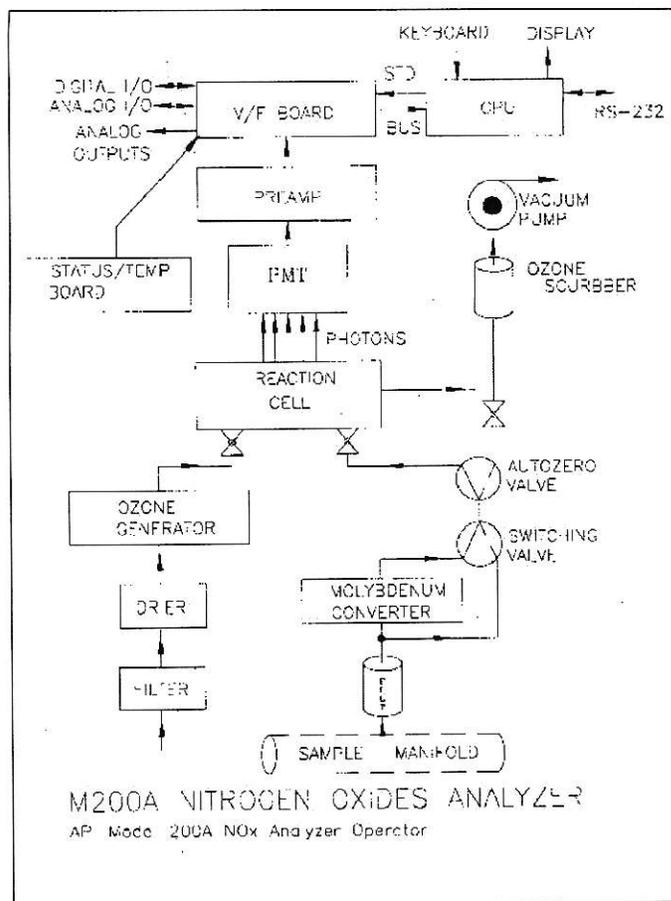


Figura N°70 Esquema del equipo API Series 200A ocupado para el análisis de NO y NO_x ((fuente: Api, 1996).

Regulación aprobada:

El Modelo 200A NO/NO₂/NO_x, está designado como Método de Referencia Número RFNA-1194-099 en 40 CFR, Parte 53, cuando es operado bajo la siguientes condiciones:

- Rango: entre los 50 ppb y los 1 ppm.
- Temperatura ambiental entre los 5 y 40 °C
- Rango en la línea de voltaje de 105-125 VAC, 60 Hz; 220-240 VAC, 50Hz
- Con 5-micrón elemento filtro TFE instalado en el ensamblado del filtro interno.
- Flujo de muestreo de 500±50 cc/min.
- Bomba de vacío (interna o externa) de 14^{''} Hg Abs presión @ 2 slpm o mejor.
- Condiciones de Software:
 - Span dinámico: OFF
 - Cero dinámico: OFF
 - Factor de dilución: 1.0
 - Auto calibración: ON o OFF
 - Rango Independiente: ON o OFF

- Autorango: ON o OFF
- Compensación temp/presión: ON

Especificaciones

Tabla N° 18 Especificaciones técnicas para el monitor de NO/NO₂/NO_x (fuente: Api, 1996).

Rango de medición:	50 ppb a 20 000 ppb
Rangos independientes para :	NO/NO ₂ /NO _x
Auto rangos:	Si
Unidades de medida :	ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³
Ruido cero*:	0.2 ppb
Ruido span*	< 0.5% de lectura (sobre 50 ppb)
Limite de Detección*	0.4 ppb
Linealidad	1 % escala completa
Precisión*	0.5 % de lectura
Tasa de flujo de muestreo	500 cc/min ± 10 %
Rango de temperatura	5-40°C
Coefficiente de Temperatura:	< 0.1 % / °C

**definido por la US EPA.*

API Series 400, Analizador de O₃ (Api, 1996).

La detección de la molécula de O₃ está basada en la absorción de la radiación UV a 254 nm. El Model 300 ocupa una lámpara de mercurio la que emite luz a una longitud de onda de a 254 nm. La lámpara ilumina bajo un hueco del tubo de vidrio, el que es llenado alternadamente con gas de muestreo y gas limpiador que remueve al O₃. La proporción entre la intensidad de luz que pasa a través del gas limpiador y la muestra es la misma que la proporción I/I_0 . Esta relación es la forma básica para el cálculo de la concentración de O₃.

El cálculo de la concentración de O₃ se realiza a través de la ley de Lambert-Beer, mostrada a continuación:

$$[O_3]_{(ppm)} = \frac{-1 \times T \times 29.92 \text{ inHg} \times 10^6 \text{ ppm}}{\epsilon \times l \times 273^\circ \text{ K} \times P} \times \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (LII)$$

Donde:

- I = intensidad de luz que pasa a través de la muestra
- I_0 = intensidad de luz que pasa a través de la muestra libre de ozono
- ϵ = coeficiente de extinción molar
- l = Trayectoria a través de la muestra
- T = Temperatura en Kelvin
- P = Presión en pulgadas de mercurio
- \ln = Logaritmo natural

La intensidad de luz es convertida en el módulo de detección en una diferencia de potencial eléctrico. Este voltaje es transformado de voltaje a frecuencia. La digitalizada información es utilizada por la CPU para calcular la concentración según la ecuación superior.

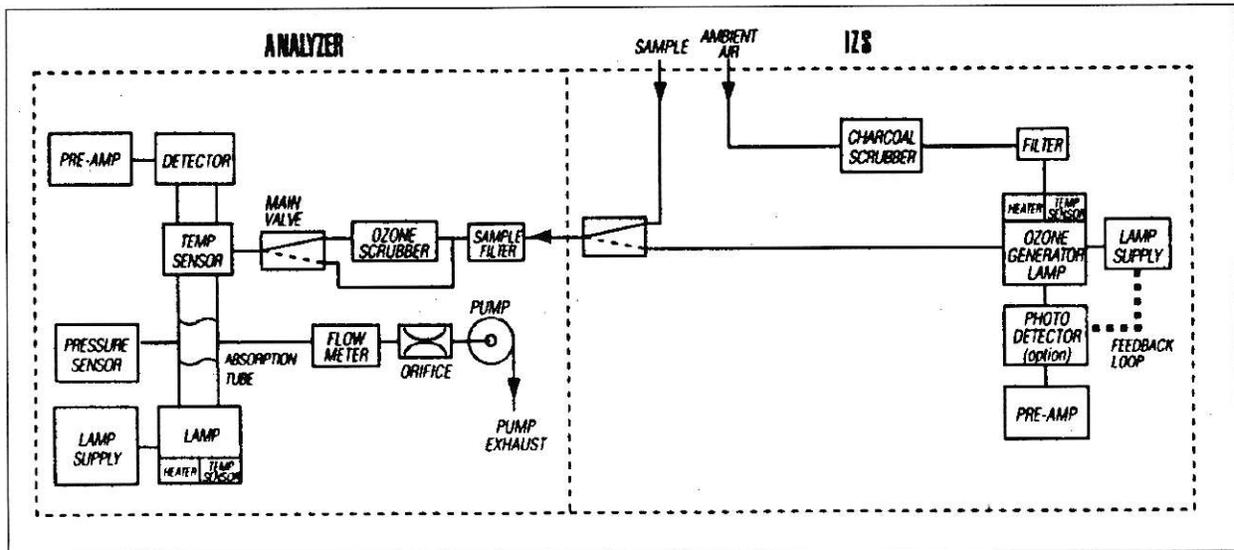


Figura N°71 Esquema del equipo API Series 400 ocupado para el análisis de O₃

Regulación aprobada:

El Modelo 400 analizador O₃, está designado como Método de Equivalente Número EQSA-0495-087.

Especificaciones:

Tabla N° 19 Especificaciones técnicas para el monitor de O₃

Rango de medición:	100 ppb a 10 ppm
Unidades de medida	ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³
Ruido cero*	0.0003 ppm
Ruido span*	< 0.5% de lectura (sobre 50 ppb)
Límite de Detección*	0.0006 ppb
Linealidad	1 % escala completa
Precisión*	0.5 % de lectura
Tasa de flujo de muestreo	800 cc/min ± 10 %
Rango de temperatura	5-40°C*

*definido por la US EPA

LAP-3000 y RASS, medición de perfiles de viento y temperatura.

(Radian International, 1997)

El LAP-3000, es un radar perfilador de vientos, al que se le adiciona un Sistema de Sondeo Radio Acústico (Inglés RASS), que provee perfiles de temperatura virtual.

El LAP-3000 transmite un pulso de energía electromagnética en una dirección. Cuando el pulso encuentra un blanco, la energía electromagnética es esparcida por la atmósfera. Una pequeña porción de esta energía retorna al radar, con lo que se puede computar la distancia del blanco, a través del tiempo de retardo entre la transmisión y la recepción del pulso. El cálculo de la velocidad y dirección del viento se realiza a partir del principio Doppler, el que establece que un cambio de la frecuencia de la onda que retorna, está provocado por el movimiento del objeto relativo al observado.

El sistema RASS, está compuesto de cuatro fuentes acústicas, una para cada lado del perfilador, las que transmiten una onda acústica direccionada verticalmente. El equipo usa las ondas acústicas que impactan al blanco, procesando los resultados de la energía retornada al radar, lo que permite medir su velocidad de propagación del pulso de sonido. El perfilador puede calcular el perfil de temperaturas virtuales, debido a que la velocidad del sonido es relacionada con la temperatura del aire.

Una vez que la señal generada por el pulso llega nuevamente al equipo es procesado y dividido en dos etapas (Uno en el dominio del tiempo y otro en el dominio de la frecuencia). En el dominio del tiempo se calcula la altura en la que se está haciendo el muestreo del viento. En cambio, a través un algoritmo matemático (Transformada de Fourier) la señal es cambiada al dominio de la frecuencia, lo que permite extraer la señal del pulso, mejorar la relación señal / ruido y estimar el corrimiento de frecuencia (efecto dopler), permitiendo el cálculo de la dirección y velocidad del viento y la temperatura del aire.

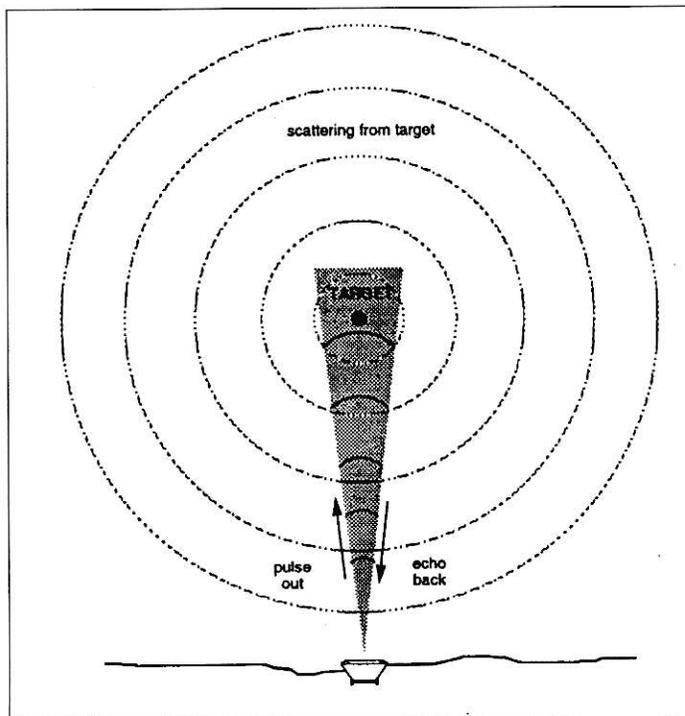


Figura N°72 Esquema del funcionamiento del equipo parte LAP-RASS (fuente: Radian International, 1997)

Especificaciones

Tabla N° 20 Especificaciones técnicas para el equipo LAP-3000
(fuente: Radian International, 1997)

Altura mínima de medición:	120 m
Altura máxima de medición:	2 a 5 km
Resolución vertical:	
<i>Con pulso de 400 ns</i>	60 m
<i>Con pulso de 700 ns</i>	100 m
<i>Con pulso de 1400 ns</i>	200 m
<i>Con pulso de 2800 ns</i>	400 m
Precisión de la velocidad del viento	< 1m/s
Precisión de la dirección del viento	< 10 grados

Tabla N° 21 Especificaciones técnicas para el equipo RASS
(fuente: Radian International, 1997)

Altura mínima de medición:	120 m
Altura máxima de medición:	1 a 2 km
Precisión de la Temperatura	1°C
Resolución mínima vertical:	60 m
<i>Con pulso de 400 ns</i>	60 m
<i>Con pulso de 700 ns</i>	100 m
<i>Con pulso de 1400 ns</i>	200 m
<i>Con pulso de 2800 ns</i>	400 m

RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE SUPERFICIE

Tabla N° 22 Ubicación y Procedencia de Estaciones Meteorológicas de la red CENMA (fuente: CENMA, 2000)

Estación	Procedencia	Fecha Instalación	Ubicación
Entel	Proy. Coop. Suecia	24 febrero 1995	Séptima Plataforma de Torre Entel Av. Libertador Bernardo O'Higgins 1409, Santiago
Los Tilos	Proy. Coop. Suecia	17 agosto 1994	INIA, Los Tilos Camino Los Guindos s/n, Buin
Lo Pinto	Proy. Coop. Suecia	15 septiembre 1994	Centro de Entrenamiento Cuerpo de Bomberos de Santiago Camino Lo Pinto s/n, Colina
La Platina	Proy. Coop. Suecia	27 julio 1994	INIA, La Platina Av. Santa Rosa 11610, Paradero 33, La Pintana
Cuesta Chada	Proy. Coop. Holanda	24 enero 1996	Portezuelo Chada Estación Sismológica U. De Chile Camino Padre Hurtado s/n, Límite Provincial
Codigua	Proy. Coop. Holanda	24 enero 1996	Cooperativa de agua potable El Esfuerzo Calle principal s/n, Codigua
María Pinto	Proy. Coop. Holanda	24 enero 1996	Casa Cuidador Fundo Los Posos Camino La isla de Rojas s/n, María Pinto
La Campana	Proy. Coop. Holanda	12 septiembre 1996	Torre CTC Celular Cerro La Campana, Talagante
La Dormida	Proy. Coop. Holanda	26 septiembre 1996	Torre CTC Celular Cuesta La Dormida, Fundo Santa Laura, Til Til
Lo Prado	Proy. Coop. Holanda	mayo 1995	Torre CTC Celular Cuesta Lo Prado, Cerro San Francisco
Mallarauco	Proy. Coop. Japón	4 de marzo 1997	Granja Avícola Don Pollo San Andrés, Bollenar
Pirque	Proy. Coop. Japón	7 de marzo 1997	Fundo El Clarillo Camino a El Principal, Km 2, Pirque
Pichidangui	Proy. Coop. Japón	9 de abril de 1997	Cooperativa de agua de Pichidangui Calle Atún 100, Pichidangui
Quilapilún	Proy. Coop. Japón	21 de abril 1997	Fundo de Juan Pablo Ureta Ruta G-131 s/n, Colina
Putú	Proy. Coop. Japón	23 de abril 1997	Parcela El Dollimo Sra. Alicia Letelier Camino Constitución - Putú, VII Región
El Manzano	Proy. Coop. Japón	16 de mayo 1997	Planta Secadora de Algas Midesa SAC Parcela 5, Camino Las Algas, San José de Maipo
La Reina	Proy. Coop. Japón	24 de mayo 1997	Edificio Laboratorios CENMA Av. Larraín 9975, La Reina
El Paico	Proy. Coop. Japón	5 de junio 1997	Torre de comunicaciones del Centro de Entrenamientos de la Academia Nacional de Bomberos Ruta 78, Km 47, Melipilla
Polpaico	Proy. Coop. Japón	16 de julio de 1997	Predio Agrícola de Sun Seeds Camino G-132, 1,5 km a Estación Polpaico,

13 Anexo B

Emisiones de contaminantes en Santiago y otros gráficos.

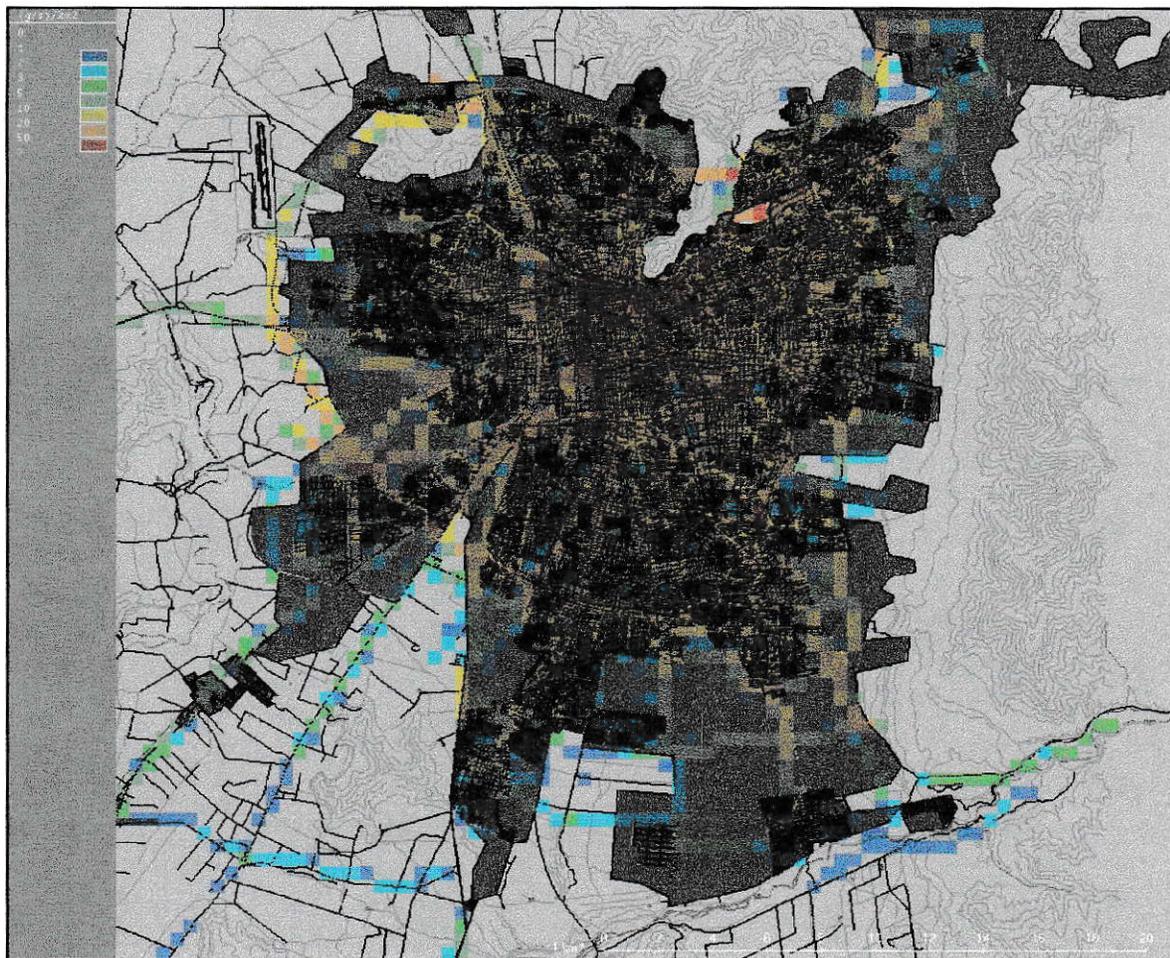


Figura N° 73 Distribución espacial de las emisiones estimadas de CO. Valores promedio para el año 1998 (fuente: CENMA, 2001)

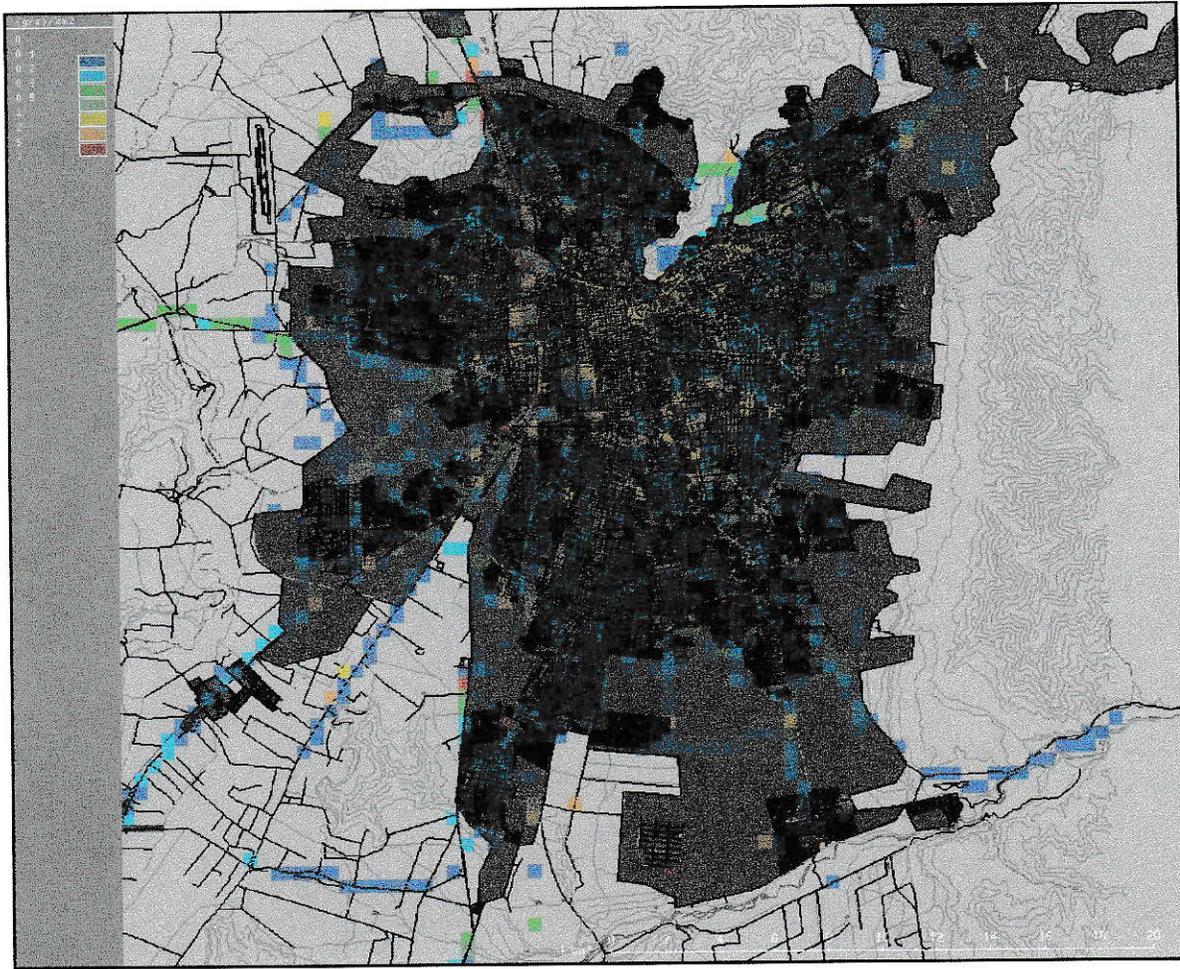


Figura N° 74 Distribución espacial de las emisiones estimadas de SO₂. Valores promedio para el año 1998 (fuente: CENMA, 2001)

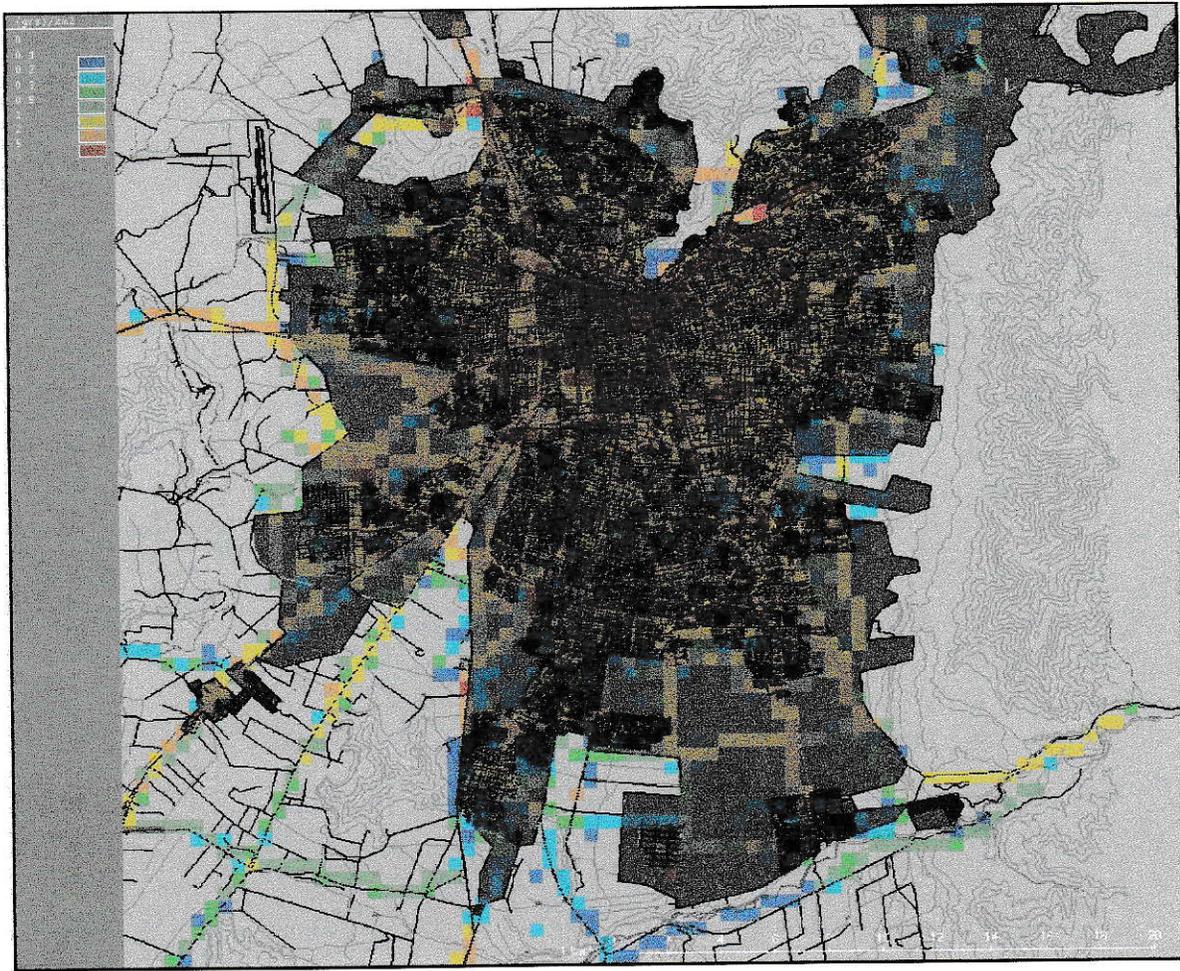


Figura N° 75 Distribución espacial de las emisiones estimadas de NO_x . Valores promedio para el año 1998 (fuente: CENMA, 2001).

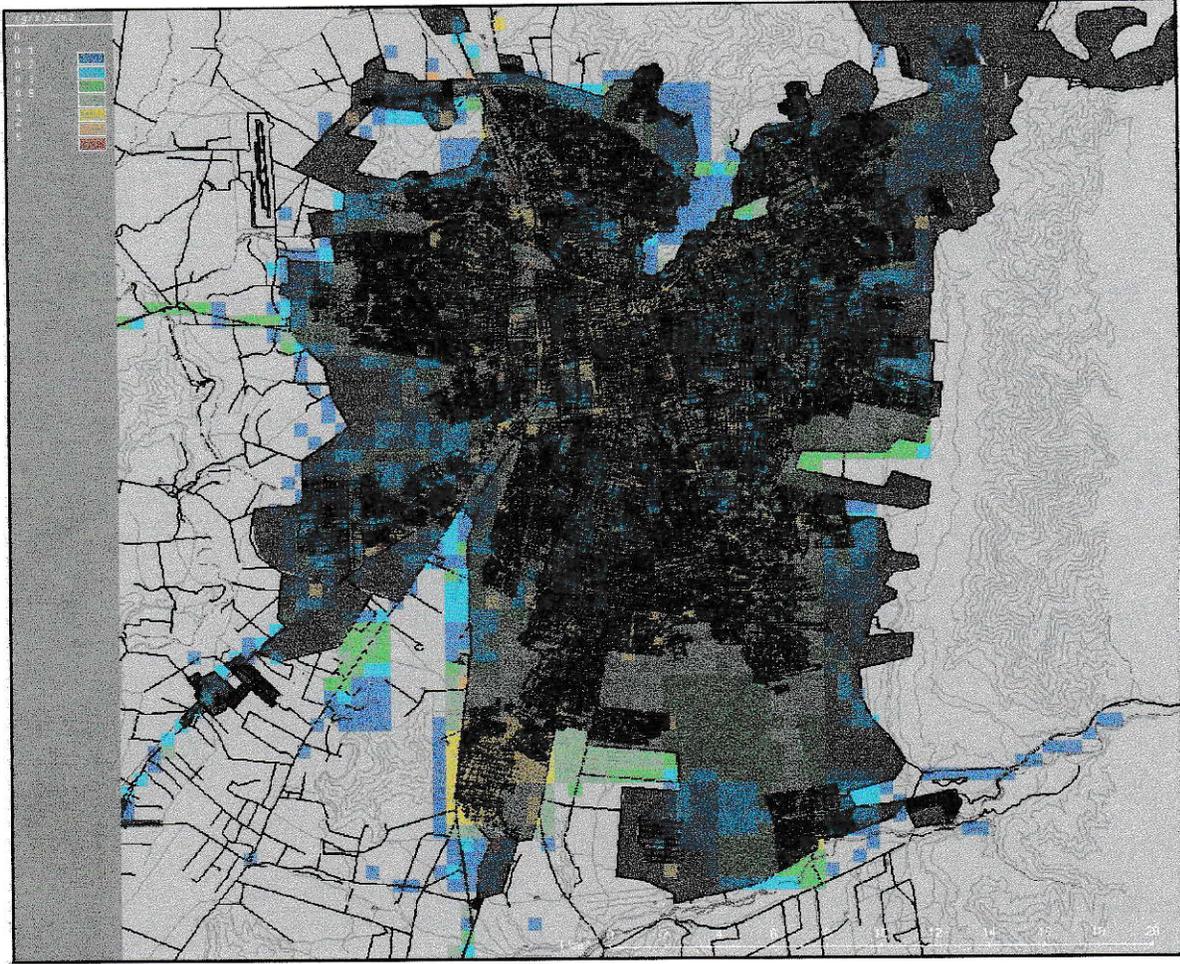


Figura N° 77 Distribución espacial de las emisiones estimadas de PM10 por fuentes fijas. Valores promedio para el año 1998 (fuente: CENMA, 2001)

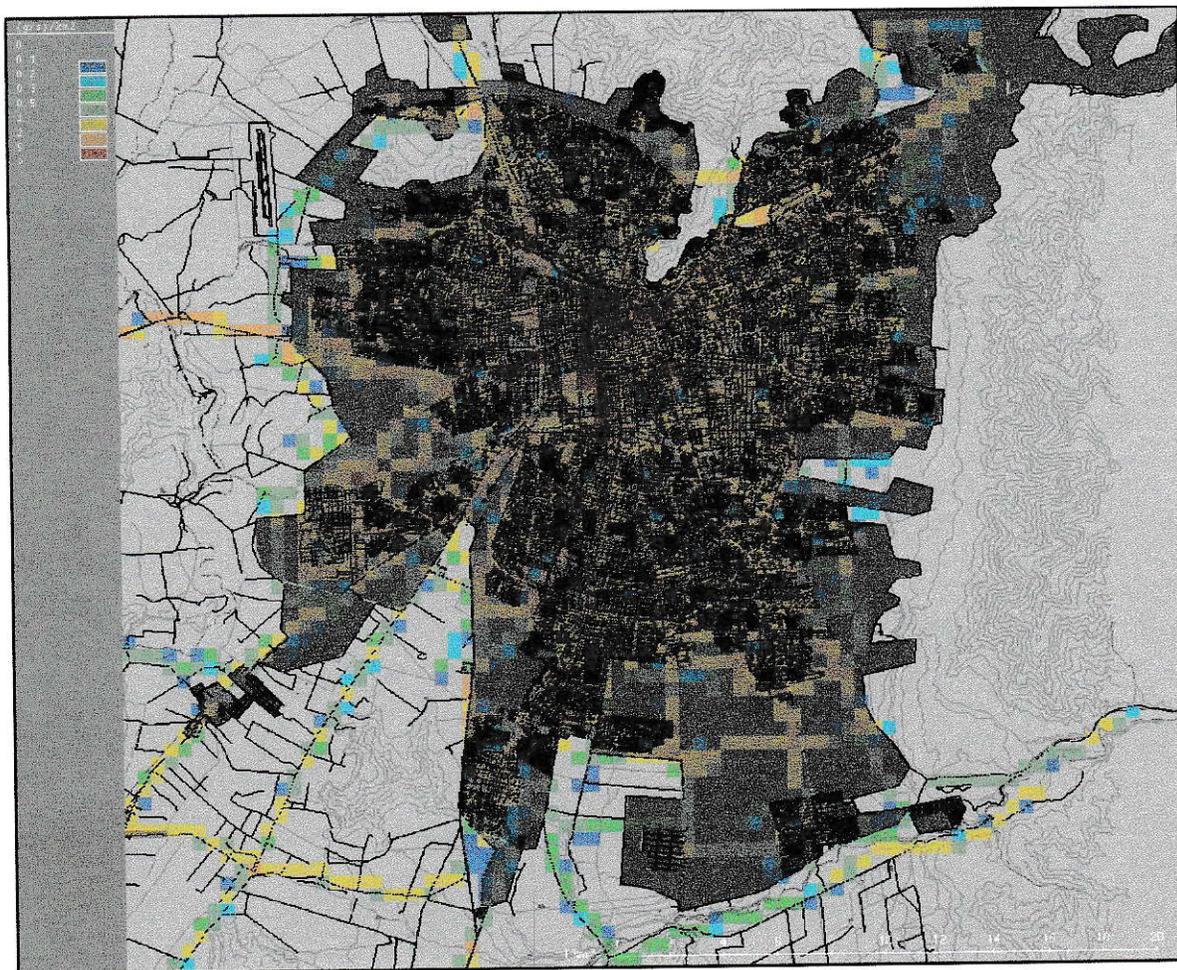


Figura N° 78 Distribución espacial de las emisiones estimadas de PM10 en calles. Valores promedio para el año 1998 (fuente: CENMA, 2001)

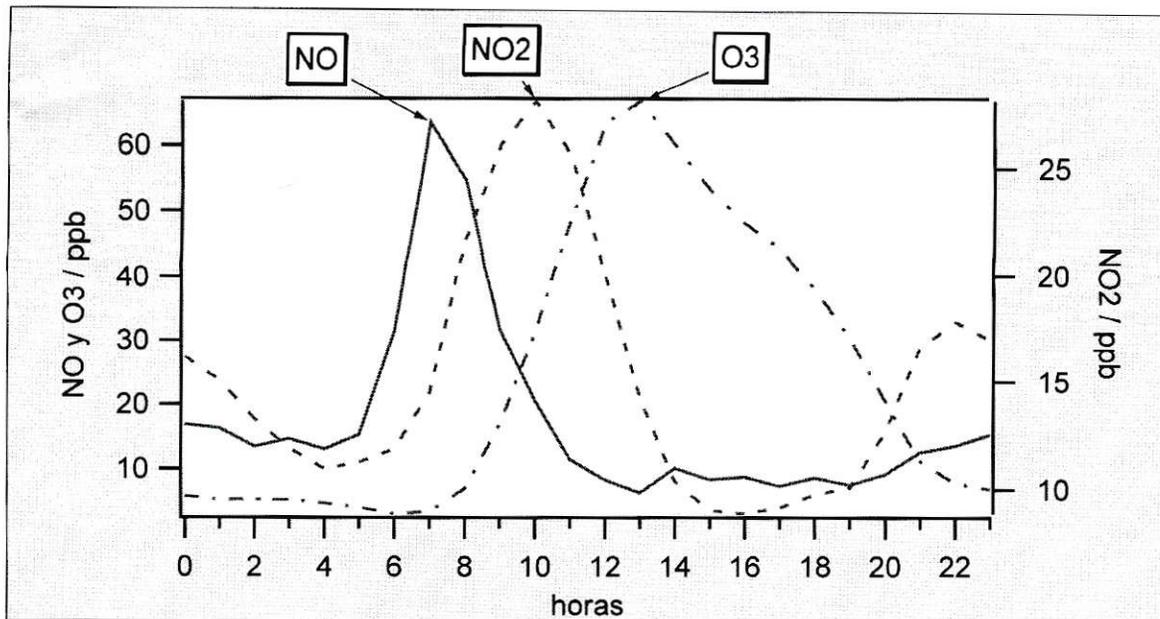


Figura N° 79 Perfiles de concentración de NO, NO2 y O3, para la ciudad de Santiago durante el mes de Enero de 1998 (elaboración propia).