

UCH-FC
U-AMBIENTAL
R. 586
C. 1



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Química Ambiental

CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

FINO DE ORIGEN URBANO

Memoria de Título entregada a la
Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos
para optar al Título de
Químico Ambiental

por

María Alejandra Ríos Rodríguez



Director de tesis: Dr. Raúl G. E. Morales
Co-Director de tesis: Q. María Rosa González O.

2004

UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Ciencias

INFORME DE APROBACIÓN

SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile que la Memoria de Título presentada por la candidata

María Alejandra Ríos Rodríguez

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la Memoria de Título como requisito para optar al Título de Químico Ambiental.

Comisión de Evaluación de la Memoria de Título

Dr. Raúl G. E. Morales S., Director de Memoria de Título

Qco. María Rosa González, Co- Director de Memoria de Título

M.Cs. Sylvia Copaja C., Corrector

Dr. Manuel A. Leiva G., Corrector

*A mis Padres
y a toda mi familia.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las Instituciones que colaboraron en la realización de este estudio. A la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, a la Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) por su infraestructura y uso de Laboratorios, al Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA) por facilitarme el uso de la estación de la Red MACAM.

Agradezco además a todas las personas que me ayudaron en la realización de este Seminario de Titulo

A mi director de Seminario el Dr. Raúl G. E. Morales por su apoyo y dedicación entregada durante la realización de mi trabajo.

A mi Co-directora de Seminario María Rosa González por su fuerza y conocimientos entregados.

A Verónica Muñoz, por su apoyo y experiencia otorgada.

A todos los que conforman el Laboratorio de Luminiscencia y Estructura Molecular, especialmente a Patricio Jara, Carmen Gloria, Andrés y al Profesor Víctor Vargas por todos los consejos y apoyo brindado durante mi carrera.

A mis grandes amigos Marianela, Luciano, Memo y Rafa por su cariño y amistad incondicional, en especial a Enzo por su gran amor.

Agradezco a mis padres Ma. Teresa y Luis, a mis hermanos y abuelos, y a toda mi familia. Gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xii
SUMMARY.....	xiv
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CIUDAD DE SANTIAGO..	5
I.1.2 RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AIRE DE LA CIUDAD DE SANTIAGO.....	6
I.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL MATERIAL PARTICULADO	8
I.3 HIPÓTESIS.....	14
I.4 OBJETIVOS	14
I.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
I.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
II.1 EQUIPAMIENTO DE MUESTREO	15
II.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	21
II.2.1 TOMA DE MUESTRAS	21
II.2.2 ACONDICIONAMIENTO Y GRAVIMETRÍA DE FILTROS	22

II.2.3	DETERMINACIÓN DE IONES INORGÁNICOS.....	22
II.2.3.1	EXTRACCIÓN.....	22
II.2.3.2	ANÁLISIS QUÍMICO.....	23
II.2.4	DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAHs).....	23
II.2.4.1	EXTRACCIÓN.....	23
II.2.4.2	ANÁLISIS QUÍMICO.....	25
CAPÍTULO III	RESULTADOS OBTENIDOS.....	27
III.1	ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE MUESTREO.....	27
III.2	ESTUDIO DE LAS CONTRIBUCIONES DE MATERIAL PARTICULADO	29
III.3	CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....	33
III.4	GRAVIMETRÍA.....	35
III.5	ANIONES.....	39
III.6	CATIONES.....	43
III.7	HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS.....	47
CAPÍTULO IV	DISCUSIÓN.....	56
CAPÍTULO V	CONCLUSIÓN.....	60
CAPÍTULO VI	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÉNDICE A	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1. Porcentaje de respirabilidad de los aerosoles atmosféricos en función del tamaño de partícula en μm	5
Tabla I-2. Estaciones de la Red MACAM y contaminantes medidos actualmente.	6
Tabla I-3. Propiedades Físicas de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.	9
Tabla I-4. Clasificación de carcinogenicidad de PAHs de la USEPA y de IARC.....	10
Tabla II-1. Características de las etapas del impactador MOUDI.	18
Tabla II-2. Condiciones de muestreo efectuados con muestreador MOUDI en la comuna de Pudahuel, Santiago.....	21
Tabla II-3. Iones característicos para la detección por GC-MS de PAHs.	26
Tabla III-1. ICAP promedios y concentraciones de masa obtenidas con MOUDI en Pudahuel. (*).....	27
Tabla III-2. Fechas de muestreo de material particulado y los Episodios Ambientales entre los días 15/05/03 al 19/06/03 en la Estación de Monitoreo de la Red MACAM de Pudahuel.....	29
Tabla III-3. Masa recolectada de las distintas fracciones de material particulado.....	36
Tabla III-4. Concentraciones Ambientales de Material Particulado según Diámetro de Partícula Aerodinámico entre el 15/05/03 al 19/06/03.	36
Tabla III-5. Límites de detección analíticos para aniones.....	39
Tabla III-6. Concentraciones de Cloruro vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	39
Tabla III-7. Concentraciones de Sulfato vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	40

Tabla III-8. Concentraciones de Nitrato vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	40
Tabla III-9. Límites de detección analíticos para cationes analizados.....	43
Tabla III-10. Concentraciones de Amonio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	43
Tabla III-11. Concentraciones de Calcio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	44
Tabla III-12. Concentraciones de Potasio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.....	44
Tabla III-13. Curvas de calibración y Límites de detección de PAHs.....	48
Tabla III-14. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 15/05/03 al 22/05/03.	49
Tabla III-15. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 29/05/03 al 05/06/03.	49
Tabla III-16. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 12/06/03 al 19/06/03.	50
Tabla A-1. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 15/05/03 al 19/05/03.	64
Tabla A-2. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 19/05/03 al 22/05/03.....	65
Tabla A-3. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 29/05/03 al 02/06/03.....	66
Tabla A-4. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 02/06/03 al 05/06/03.....	67
Tabla A-5. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 12/06/03 al 16/06/03.....	68

Tabla A-6. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 16/06/03 al 19/06/03.....	69
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Distribución y mecanismos de formación del material particulado en la atmósfera.....	3
Figura I-2. Mapa de ubicación de las Estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos y de variables meteorológicas de Santiago.....	7
Figura I-3. Estructuras de PAHs identificados como contaminantes prioritarios por la USEPA. (*)PAHs que se consideran como cancerígenos.	11
Figura I-4. Distribución de iones por diámetro de partículas.	13
Figura II-1. Equipo de muestreo Micro Orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI. .	15
Figura II-2. Esquema de un impactador de cascadas mostrando las trayectorias de tres diferentes tamaños de partículas ⁽¹⁰⁾	16
Figura II-3. Esquema de la trayectoria de una partícula en una etapa del impactador MOUDI.	17
Figura II-4. Curvas de eficiencia características para un impactador de cascada.	18
Figura II-5. Gabinete rotatorio o Sistema rotor del muestreador MOUDI.....	19
Figura III-1. ICAP promedio y concentraciones totales obtenidas por el muestreador MOUDI en la estación de Pudahuel.....	28
Figura III-2. Correlación concentraciones MOUDI v/s ICAP promedio.....	28
Figura III-3. Concentraciones diarias de material particulado por equipo TEOM de la Red MACAM en Pudahuel del 16 al 22 de Mayo 2003.....	30
Figura III-4. Concentraciones diarias de material particulado con equipo TEOM de la Red MACAM en Pudahuel del 30 de Mayo al 5 de Junio 2003.....	31

Figura III-5. Concentración diaria de material particulado por equipo TEOM en la estación de la Rd MACAM en Pudahuel del 13 al 19 de Junio 2003.....	32
Figura III-6. Condiciones Meteorológicas entre el 15 al 19 de Mayo 2003, M1.....	33
Figura III-7. Condiciones Meteorológicas del 29 de Mayo al 2 de Junio 2003, M3.	34
Figura III-8. Condiciones Meteorológicas del 12 al 16 de Junio 2003, M5.....	34
Figura III-9. Filtros obtenidos a través del muestreador MOUDI en la Estación de la Red MACAM en Pudahuel.....	35
Figura III-10. Distribución de concentraciones ambientales vs el Diámetro de Partícula Aerodinámico de los episodios con Pre-Emergencia M1, Alerta M3 y Normal M5 en la Estación de Pudahuel.	37
Figura III-11. Distribución de concentraciones ambientales vs Diámetro de Partícula Aerodinámico de los episodios de Alerta M3 y la caída de Alerta M4 en Pudahuel.	38
Figura III-12. Concentración de Cloruro vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.....	41
Figura III-13. Concentración de Sulfato vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.....	41
Figura III-14. Concentración de Nitrato vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.....	42
Figura III-15. Concentración de Amonio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.....	45
Figura III-16. Distribución de Calcio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.	46
Figura III-17. Distribución de Potasio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.....	46
Figura III-18. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 15/05 al 22/05 del 2003.	51
Figura III-19. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 29/05 al 05/06 del 2003.	51

Figura III-20. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 12/06 al 19/06 del 2003	52
Figura III-21. Concentraciones de Benzo(a)antraceno vs Diámetro de Partícula.....	53
Figura III-22. Concentraciones de Criseno vs Diámetro de Partícula.....	53
Figura III-23. Concentraciones de Benzo(b)fluoranteno y Benzo(k)fluoranteno vs Diámetro Partícula	54
Figura III-24. Concentraciones de Benzo(a)pireno vs Diámetro Partícula.	54
Figura III-25. Concentraciones de Indeno(1,2,3-cd)pireno vs Diámetro Partícula.....	55

RESUMEN

Recién, en los últimos años, ha cobrado particular interés el impacto del particulado fino en la salud de la población urbana, al ser este material considerado como uno de los contaminantes atmosféricos que tienen su origen principalmente en la actividad antropogénica. La ciudad de Santiago no ha estado ajena a este tipo de contaminación atmosférica y hasta la fecha, no se han realizado estudios sobre el fraccionamiento y la correspondiente caracterización química de dicho material particulado fino, conocido bajo la denominación de aerosoles secundarios.

En la Comuna de Pudahuel se presentan, por lo general, los índices más altos de contaminación respecto a las demás estaciones de monitoreo de la ciudad. De ahí que el objetivo central de este estudio ha sido caracterizar la presencia de estos aerosoles secundarios a nivel de la distribución por tamaño y composición química, preferentemente inorgánica, en períodos de episodios de contaminación atmosférica en esta zona.

Para esta finalidad el aerosol presente en la atmósfera de Pudahuel fue muestreado empleando un equipo impactador de cascada, MOUDI (Micro Orifice Uniform Deposit Impactor), que separa el material particulado en diferentes fracciones de acuerdo al diámetro aerodinámico de las partículas. Las fracciones analizadas corresponden a las siguientes: 18; 3,2; 1,8; 1,0; 0,56; 0,32; 0,18; 0,10 y menor que 0,1 micrones. Con este fraccionamiento se realizó el análisis gravimétrico y caracterización química, en la composición inorgánica, tanto de aniones y cationes en la fase soluble de los aerosoles, mediante cromatografía iónica. Además, se realizó una caracterización

química de compuestos orgánicos del tipo Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs), los que presentan un potencial cancerígeno para la salud de las personas. Estos fueron separados, identificados y cuantificados mediante cromatografía de gases acoplado a un detector de masas selectivo.

Los muestreos de material particulado se llevaron a cabo en el periodo mayo y junio del año 2003, período en el cual se produjeron días de episodios críticos correspondientes a una preemergencia, y alertas ambientales. Los resultados nos muestran que los incrementos en concentración de material particulado fino ocurren en períodos muy cortos de tiempo, favorecidos por las condiciones meteorológicas imperantes. Las concentraciones de amonio y nitrato resultan ser predominantes respecto de los demás cationes y aniones inorgánicos a la hora de constituir aerosoles secundarios, cuya fracción mayor se encuentra en las partículas menores a 1 μm . Estos iones incrementan notablemente su concentración en los procesos de formación de partículas finas que acompañan los períodos de episodios críticos, según queda de manifiesto en los muestreos desarrollados. Por otra parte, los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos presentan una mayor concentración en los muestreos donde se produjeron los episodios de alerta y preemergencia ambiental.

Debido a que este estudio es el primero que se realiza en su género en la ciudad de Santiago, resulta recomendable extender su campo de aplicación a otros sectores de la ciudad durante el próximo invierno 2004, en un análisis comparativo, como también iniciar un fuerte control de las fuentes de amonio localizadas en la zona de Pudahuel, debido a que este catión es el principal generador de aerosoles secundarios encontrados en esta zona.

SUMMARY

During the last years, secondary aerosols have been subject of interest due to the impact that these fine particles have on the population health. This atmospheric material has been considered as one of the most important urban air pollution, due its origin in the anthropogenic activities. Santiago city present the same atmospheric pollution behavior as the most important city of the world, however, up to date, there are no studies respect to the secondary aerosols in terms of the size fractions and chemical compositions under critical episodes of air pollution.

In the Comuna de Pudahuel were found the highest indices of air pollution respectivity to all monitoring stations in the city. In the present thesis, we have developed a study of the secondary aerosols by means of fractioning of the aerodynamic diameter size of fine particles as well as the inorganic chemical composition in this area, under critical episodes of air pollution.

In order to carry out the present work, we have used equipment for aerosol collection, called Micro Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI), which permits determine the following fractions: 18, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32, 0.18, 0.10 and minor than 0.1 microns. For every one of these fractions we have done a gravimetric analysis and a chemical characterization, in the soluble inorganic phase. These last characterizations involve the main cations and anions by means of ionic chromatography. Furthermore, the chemical analysis was extended to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), which have a carcinogenic potencial, by means of gas chromatography coupled to mass detector.

The sample determinations were carried out in May and June of 2003. In this period the Santiago City had one pre-emergency and two alert critical episodes of air pollution. Our studies are conclusive in determine the fine particle formation in short period of time, as well as identified the special meteorological conditions necessary for its formation. Ammonium and nitrate were the predominant ions in the secondary aerosols determined under critical episodes of air pollution conditions. The concentrations of these ions increase suddenly in fine particles of lower than 1 micron of aerodynamic diameters during the days of critical episodes of air pollution. Similarly, the PAHs increase its concentration for the same critical episodes of air pollution.

The present study is the first work developed in Santiago city and therefore, we have suggested to prepare a new study involving the main areas of the city in order to establish a comparative analysis during the winter of 2004 as well as establish a strong control of the source of ammonium, a main source of the secondary aerosols present in Pudahuel.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo urbano y poblacional que ha tenido la Región Metropolitana, especialmente Santiago en la última década, ha producido altos niveles de contaminación atmosférica provocando que el volumen de desechos emitidos y la velocidad a la que se incorporan al aire, sobrepasan las posibilidades de depuración de los ciclos naturales, provocando serios daños a la salud de la población, animales y plantas, y un deterioro a los materiales.

Por otro lado, las condiciones geográficas y meteorológicas de la cuenca de Santiago son particularmente desfavorables para una adecuada dispersión de contaminantes, especialmente en el período otoño-invierno, con baja circulación de los vientos y, por tanto, una débil renovación del aire al interior de ésta. Por lo que, en condiciones de estabilidad atmosférica, los contaminantes quedan atrapados en esta zona, salvo cuando surgen condiciones meteorológicas que generan precipitaciones, permitiendo una limpieza temporal del aire, aspectos determinantes de la intensidad de un proceso de contaminación, ya que viene a incidir sobre la concentración del contaminante en el aire y en el tiempo de exposición.

Algunos de los contaminantes atmosféricos que se encuentran normados en Chile son el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y el material particulado respirable (PM10). En Santiago, durante el período otoño-invierno su población se ve afectada por un aumento significativo en los niveles de contaminación del aire. De acuerdo a la normativa vigente, los criterios para decretar un episodio crítico de contaminación están referidos al Material Particulado respirable o

PM10, que solo tiene promedio móvil de 24 h de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y al monóxido de carbono, a través del Índice de Calidad de Aire referido a Material Particulado "ICAP" ⁽¹⁸⁾. Esta es una escala estándar, referidos al valor promedio de las concentraciones del PM10, de acuerdo a lo que establece la norma para este contaminante. De esta forma es posible determinar que se está en presencia de un episodio crítico cuando se alcanza, en al menos una de las estaciones de la red de monitoreo, niveles de calidad de aire que superan el nivel en $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y según vaya empeorando la calidad del aire, se alcanzan rangos que definen los niveles de alerta, preemergencia o emergencia. ^(26,30)

De las ocho estaciones de monitoreo de la Red MACAM, "Monitoreo Automático de Calidad de Aire y Meteorología", con las que cuenta Santiago, la que generalmente registra los mayores índices de contaminación es la estación de Pudahuel para PM 10, ubicada al nororiente de la ciudad. Resulta de notoriedad constatar que tanto de material particulado respirable como otros contaminantes atmosféricos ^(26,25) impactan a la población, por esto, las consultas por síndrome bronquial obstructivo aumentan en un 22 % luego de un período de alta contaminación ambiental (Cinab, U. de Chile). Siendo Pudahuel la zona de mayor riesgo, es que se eligió esta estación para la realización de medición del fraccionamiento por tamaño de partícula y su respectiva caracterización química.

El material particulado respirable se puede clasificar de acuerdo a rangos de tamaños de las partículas en fracciones del tipo PM10 y PM2,5. El primero considera aquellas partículas gruesas, en su mayoría de origen básico, producto del polvo de suelo. La fracción más pequeña está constituida por aquellas partículas de diámetro inferior o

igual a $2,5 \mu\text{m}$ y agrupa a partículas generalmente de origen ácidas que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales.

Las partículas finas son generadas principalmente por procesos de condensación, nucleación y agregación de compuestos químicos de baja volatilidad. En cambio, la fracción gruesa es emitida principalmente por procesos mecánicos, como por ejemplo el levantamiento de partículas por el viento. Ver Figura I-1.

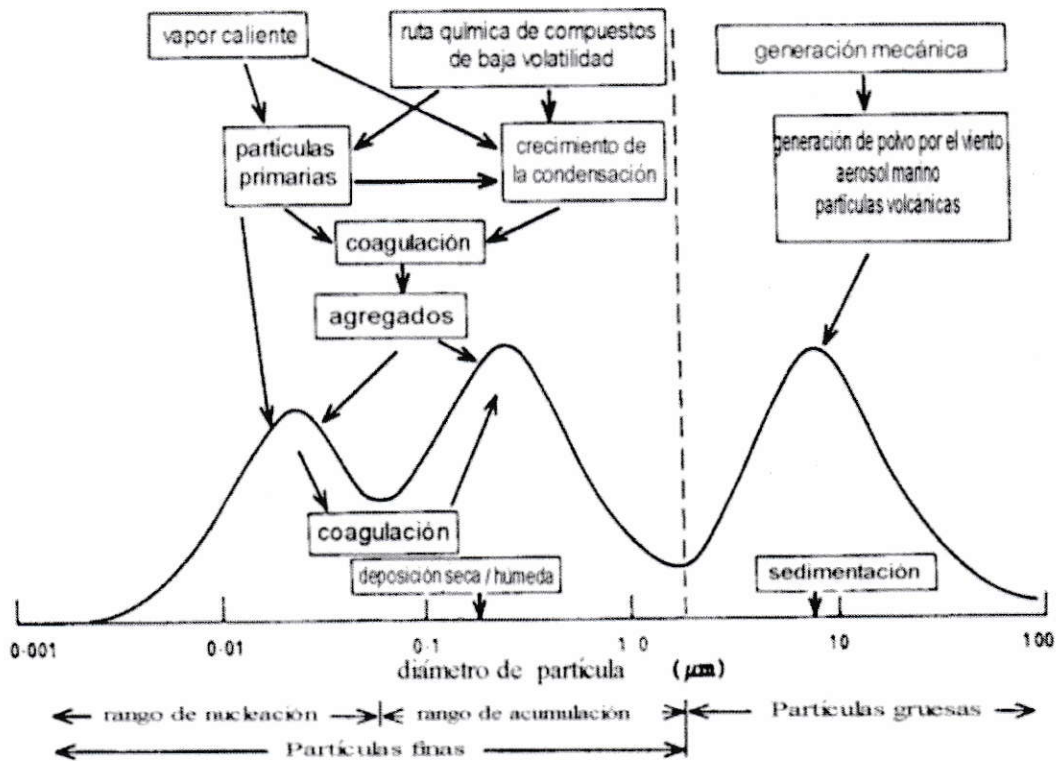


Figura I-1. Distribución y mecanismos de formación del material particulado en la atmósfera.

Los efectos en salud vinculados a la exposición prolongada de este tipo de contaminante corresponden a un aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos o irritación de ojos y nariz ^(2, 5), donde los grupos etarios más afectados son los niños, ancianos y los enfermos con cuadros respiratorios crónicos. El factor determinante en el efecto en salud es el tamaño de las partículas, debido al grado de penetración y permanencia que éstas tienen en el sistema respiratorio depositándose en bronquios, bronquiolos y alvéolos pulmonares y de allí pudiendo llegar al torrente sanguíneo. Una vez que las partículas se han depositado en el sistema respiratorio, su acción irritante es producto por una parte, de su composición química y su toxicidad y por otra parte a su mayor capacidad de adsorción, lo que les permite adherir a su superficie externa otras sustancias, tales como metales pesados e hidrocarburos, incluyendo en estos últimos a los del tipo aromático como el benzopireno, de conocida capacidad cancerígena ⁽⁵⁾. Otro factor importante respecto a las partículas es la variedad de formas que poseen, ya que conociendo su forma y su diámetro se permitiría evidenciar su origen y sus posibles transformaciones en la atmósfera⁽⁵⁾.

Si bien las partículas menores a 10 μm están dentro del rango respirable, solo las menores de 2 μm son 100 % respirables, razón por la cual el estudio de estas últimas, tanto en su composición química como en su fraccionamiento por diámetro de partícula resulta esencial para evaluar el impacto sobre la salud, como se muestra en la Tabla I-1.

Tabla I-1. Porcentaje de respirabilidad de los aerosoles atmosféricos en función del tamaño de partícula en μm .

Respirabilidad (%)	0	25	50	75	100
Tamaño Partícula (μm)	10	5,0	3,5	2,5	2,0

Fuente: Préndez, 1992.

La Red MACAM a través de un muestreador tipo dicótopo separa las partículas en dos rangos de tamaño, PM10 y PM2,5 teniendo este último sólo como referencia de masa.

I.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

Uno de los aspectos geográficos fundamentales de la cuenca de Santiago es su enclaustramiento. La cordillera de los Andes por el este con cerros que superan los 3200 m (cerro San Ramón), la cuesta del Manzano y Chacabuco por el norte, la cordillera de la costa por el oeste, que alcanza alturas sobre los 1500 m, y la Angostura de Paine por el sur, conforman un perímetro de elevaciones de más de 1000 m de altura en promedio (25).

Los flujos al interior de la cuenca se producen fundamentalmente por el desarrollo de brisas de valle-montaña; durante el otoño y el invierno, el aire frío se asienta en la cuenca y se dan las denominadas condiciones de estabilidad, un factor altamente negativo ya que se inhibe la mezcla de las masas de aire y cualquier elemento emitido permanece en los niveles atmosféricos más bajos, especialmente el material particulado (5).

I.1.2 RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AIRE DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

El monitoreo de los contaminantes en la Región Metropolitana comenzó en 1988 con la red oficial de Monitoreo Automática de Calidad de Aire y Meteorología (Red MACAM), la que contaba con cinco estaciones ubicadas en la zona céntrica de Santiago. En 1997 esta red fue modernizada y ampliada a ocho estaciones de monitores automáticos, conocidas como Red MACAM-2 operadas por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA) con el fin de proveer a las autoridades ambientales competentes información que permita proteger la salud de sus habitantes. A continuación en la Tabla I-2 se describen las estaciones y los contaminantes que se monitorean en cada una de ellas.

Tabla I-2. Estaciones de la Red MACAM y contaminantes medidos actualmente.

Estación	Año inicio	Comuna	Dirección	Contaminantes medidos actualmente
M (4)	1988	Las Condes	Av. Las Condes 11756	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, PM2.5, NO _x , (*)
B (1)	1988	Providencia	Providencia / Seminario	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, NO _x , PTS (hasta 1996), (*)
F (2)	1988	Independencia	Av. La Paz 850	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, PM2.5, NO _x
N (5)	1988	Santiago	Interior Parque O'Higgins	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, NO _x , PS, (*)
L (3)	1997	La Florida	Alonso de Ercilla 1270	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, NO _x , PS, (*)
O (6)	1997	Pudahuel	El Lazo 8667	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, PM2.5, NO _x , PS, (*)
Q (8)	1997	El Bosque	Riquelme 155	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, NO _x , PS, (*)
P (7)	1997	Cerrillos	Salomón Sack 1376	CO, SO ₂ , O ₃ , PM10, NO _x , PS, (*)

Fuente: SESMA

(*): indica CH₄ (metano), NMH (hidrocarburos no metánicos), THC (hidrocarburos totales). Fuente: PPDARM, 1997.

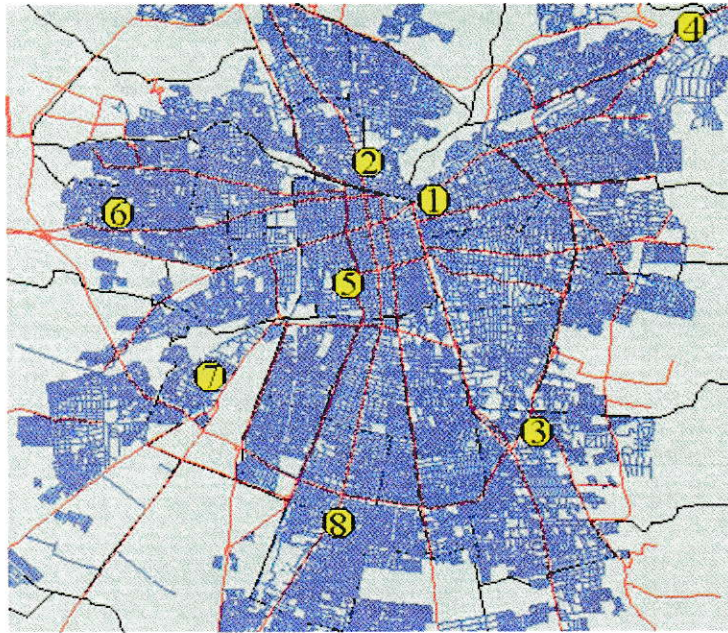


Figura I-2. Mapa de ubicación de las Estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos y de variables meteorológicas de Santiago.

Desde el año 2001 se aplica el actual sistema de pronóstico de la calidad del aire que tiene por objeto establecer un análisis científico de cómo va a evolucionar la concentración del material particulado en las siguientes 24 horas, considerando las condiciones atmosféricas actuales de la cuenca de Santiago⁽²⁶⁾.

I.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL MATERIAL PARTICULADO

La caracterización química que nos interesa observar en la fracción de material particulado fino se orienta a los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs) y los iones inorgánicos solubles.

Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos son productos que surgen de la combustión incompleta de combustibles sólidos y líquidos, formados por compuestos orgánicos con más de un núcleo de benceno que dan lugar a sustancias de peso molecular y presiones de vapor alto, lo que determinarían en parte sus velocidades de evaporación. Estos hidrocarburos son adsorbidos sobre la superficie de material particulado, preferentemente en partículas de diámetro inferior a 2 micrones que es la fracción más peligrosa por su alta retención en los pulmones y sus posibles efectos cancerígenos en el aparato respiratorio ^(5, 6,27). Estos Hidrocarburos son considerados como sustancias químicamente inertes cuando se encuentran en la atmósfera, pero al ingresar al organismo son transformados en compuestos altamente tóxicos al ser rápidamente adsorbidos. La Internacional Agency for Research on Cancer (IARC) ⁽³⁷⁾ y la USEPA han clasificado los PAHs como potenciales carcinógenos humanos, esta clasificación se muestra en la Tabla I-4.

La Figura I-3 muestra las estructuras de los 16 PAHs identificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA como contaminantes prioritarios.

Estos compuestos se encuentran en el aire urbano alrededor del mundo y también en el aire de interiores provenientes de la combustión del carbón y madera, además del humo del cigarrillo y otras fuentes. Uno de los factores que gobierna el transporte de los compuestos orgánicos es su volatilidad, donde sus presiones de vapor determinarán en parte sus velocidades de evaporación y su tendencia a adsorberse sobre el material particulado, ya que en la atmósfera, los PAHs y sus derivados se distribuyen entre las fases gaseosa y particulada. En la Tabla I-3 se presentan algunas propiedades físicas y las presiones de vapor para los distintos PAHs

Tabla I-3. Propiedades Físicas de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Compuesto	Formula Empírica	Punto de Ebullición, °C	Punto de Fusión, °C	Presión de vapor, Pa 25°C
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	217,9	80,2	2,8x10 ⁻¹
Acenaftaleno	C ₁₂ H ₈	280	92-93	9x10 ⁻¹
Acenafteno	C ₁₂ H ₁₀	279	95	3x10 ⁻¹
Fluoreno	C ₁₃ H ₁₀	295	115-116	9x10 ⁻²
Fenantreno	C ₁₄ H ₁₀	340	100,5	2x10 ⁻²
Antraceno	C ₁₄ H ₁₀	342	216,4	1x10 ⁻³
Fluoranteno	C ₁₆ H ₁₀	375	108,8	1,2x10 ⁻³
Pireno	C ₁₆ H ₁₀	150,4	393	6,0x10 ⁻⁴
Benzo(a)antraceno	C ₁₈ H ₁₂	400	160,7	2,8x10 ⁻⁵
Criseno	C ₁₈ H ₁₂	448	253,8	5,7x10 ⁻⁷
Benzo(b)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	481	168,3	6,7x10 ⁻⁵
Benzo(k)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	480	215,7	5,2x10 ⁻⁸
Benzo(a)pireno	C ₂₀ H ₁₂	496	178,1	7,0x10 ⁻⁷
Indeno(1,2,3-cd)pireno	C ₂₂ H ₁₂	536	163,6	1,3x10 ⁻⁸
Dibenzo(a,h)antraceno	C ₂₄ H ₁₄	524	266,6	3,7x10 ⁻⁸
Benzo(g,h,i)perileno	C ₂₂ H ₁₂	----	277	-----

Fuente: Hailwood ⁽³⁴⁾

Tabla I-4. Clasificación de carcinogenicidad de PAHs de la USEPA y de IARC.

Compuesto	USEPA	IARC
Acenafteno	N/A	N/A
Acenaftileno	D	N/A
Antraceno	D	3
Benzo(a)antraceno	B2	2A
Benzo(a)pireno	B2	2A
Benzo(b)fluoranteno	B2	2B
Benzo(k)fluoranteno	B2	2B
Benzo(g,h,i)perileno	N/A	3
Criseno	B2	3
Dibenzo(a,h)antraceno	B2	N/A
Fluoranteno	D	3
Fluoreno	N/A	3
Indeno(1,2,3-cd)pireno	B2	2B
Naftaleno	D	3
Fenantreno	D	3
Pireno	D	3

Fuente: Massachussets State Department of Environmental Protection, MADEP.

USEPA: B2: Probable carcinógeno humano

D: No clasificable

N/A: no disponible

IARC: 2A: Probable carcinógeno humano

2B: Posible carcinógeno humano

3: No clasificable

N/A: no disponible

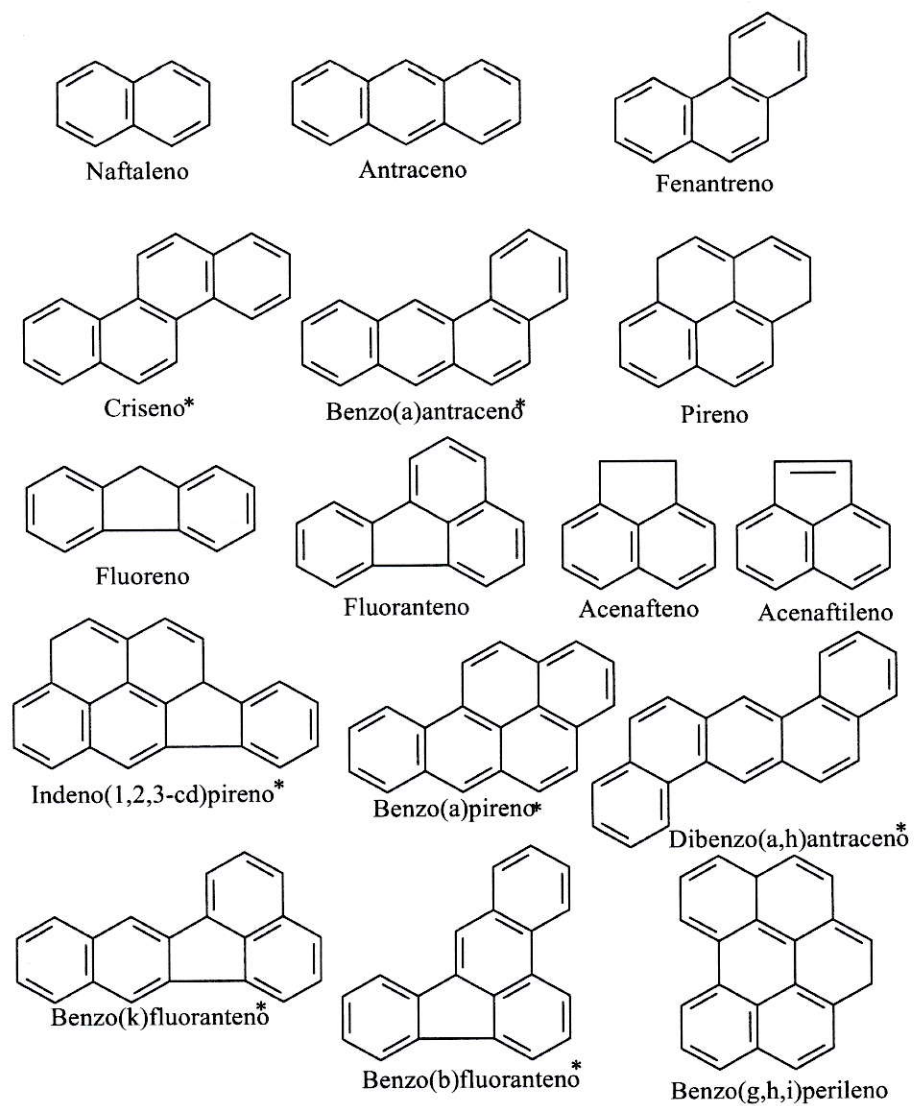


Figura I-3. Estructuras de PAHs identificados como contaminantes prioritarios por la USEPA. (*)PAHs que se consideran como cancerígenos.

Hay países que tienen legisladas las concentraciones ambientales límites de PAHs, referidos solo para Benzo(a)pireno con distinto grado de exigencia. Algunos de estos países son: Suecia con un valor recomendado de $0,1 \text{ ng/m}^3$, Reino Unido de $0,25 \text{ ng/m}^3$, Francia con $0,7 \text{ ng/m}^3$, Italia con $1,0 \text{ ng/m}^3$ y Alemania con $1,3 \text{ ng/m}^3$, siendo en este último un valor en prueba. Sin embargo, en Chile aún no existe legislación para estos compuestos.

Por otra parte, los iones inorgánicos dan origen a los aerosoles secundarios, los que se constituyen en el aire a partir de contaminantes primarios, bajo condiciones específicas y que denominamos particulado fino. Algunos iones inorgánicos son productos de reacciones físico-químicas de moléculas presentes en la atmósfera, como es el caso de NO_2 y SO_2 . Estas últimas, durante su proceso de oxidación en la atmósfera forman ácidos y posteriormente nitratos y sulfatos, es decir, sales que pueden dar origen al material particulado fino respirable, produciendo un efecto sinérgico ya que el contaminante que experimenta la transformación en la atmósfera, pudiendo generar un mayor efecto adverso que su precursor ⁽⁵⁾. Los nitratos generados por la acción antropogénica producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico presente en los procesos de combustión a altas temperaturas y los sulfatos provenientes de la combustión de azufre contenido en los combustibles fósiles, de la fundición de minerales y otros procesos industriales ⁽²⁾, son dos de los principales aniones constituyentes en estos aerosoles secundarios. En la Figura I-4 se presenta la distribución por tamaño que dan origen a estos aerosoles secundarios tanto Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} .

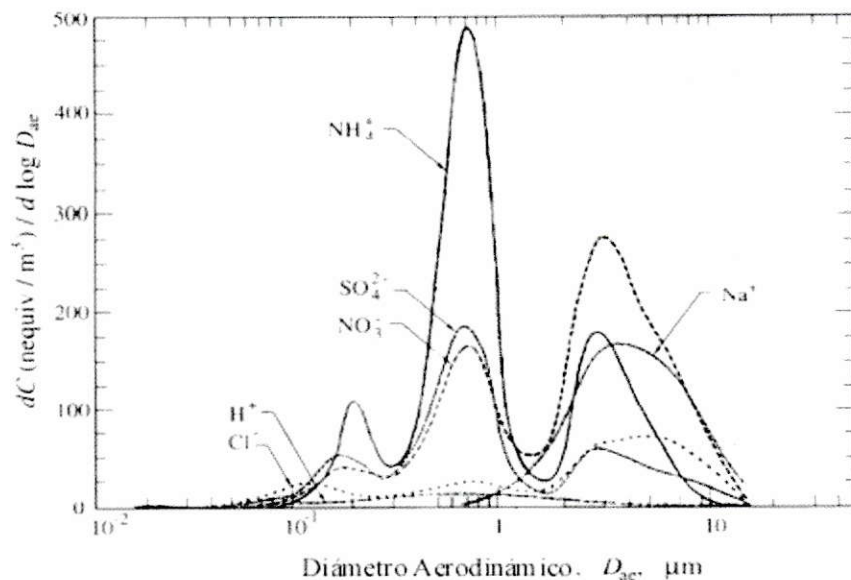


Figura I-4. Distribución de iones por diámetro de partículas.

Antecedentes bibliográficos muestran que se han encontrado concentraciones considerables de hidrocarburos aromáticos policíclicos en Massachusetts USA⁽²²⁾ y Santiago de Chile^(6,23) y de iones inorgánicos en Tennessee⁽²¹⁾ y Santiago de Chile⁽¹³⁾, situación que indudablemente se extiende a muchas ciudades en el mundo.

Es por esto, que las razones fundamentales que llevaron a la realización de este trabajo fue la falta de información científica sobre el fraccionamiento y caracterización química por diámetro de partícula con el objeto de entregar antecedentes que permiten prever los problemas de salud de la población por material particulado fino en Santiago, especialmente en la comuna de Pudahuel.



I.3 HIPÓTESIS

La zona de Pudahuel experimenta condiciones favorables a la formación de aerosol secundario lo que permite que se encuentre por sobre los niveles de concentración de partículas que en el resto de las estaciones de monitoreo de Santiago.

I.4 OBJETIVOS

I.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una caracterización química de la fracción fina de Material Particulado con un muestreador tipo cascada MOUDI en la estación de Pudahuel de la Red MACAM.

I.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a.- Conocimiento y optimización de la metodología de muestreo.
- b.- Caracterización gravimétrica y su distribución en la fracción de Material Particulado Fino.
 - b.1.- Caracterización de compuestos inorgánicos (iones) por muestra de tamaño.
 - b.2.- Caracterización de compuestos orgánicos (PAHs) por muestra de tamaño.
- c.- Análisis de la distribución por tamaño del material particulado fino en relación a los episodios de contaminación.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 EQUIPAMIENTO DE MUESTREO

Para la recolección de material particulado fino se utilizó un impactador tipo cascada con el cual es posible caracterizar la distribución de masa de partículas de acuerdo al diámetro aerodinámico. Éste está definido como el diámetro de una esfera hipotética de densidad uno que posee la misma velocidad de la partícula en estudio.

Este equipo llamado Micro Orifice Uniform Deposit Impactor “MOUDI” se muestra en la Figura II-1.

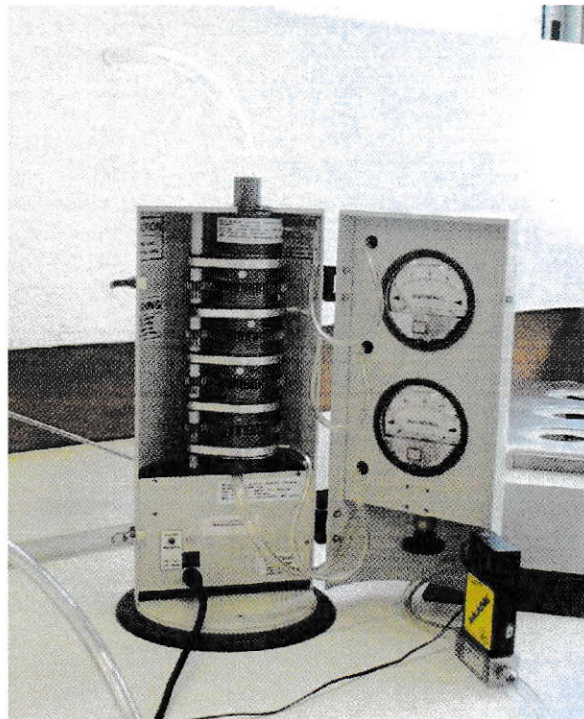


Figura II-1. Equipo de muestreo Micro Orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI.

Su principio de operación consiste en hacer pasar aire a través de una serie de etapas con agujeros cada vez más pequeños donde las partículas aceleradas impactan sobre un plato de recolección. Como las velocidades de inyección aumentan a medida que disminuye el tamaño de los orificios las fuerzas inerciales conllevan a la recolección de partículas cada vez más pequeñas donde se reduce la presión y aumenta la velocidad del flujo de aire. Cada etapa subsiguiente colecta partículas más pequeñas que la etapa anterior ^(8, 9, 10). Ver Figuras II-2 y II-3.

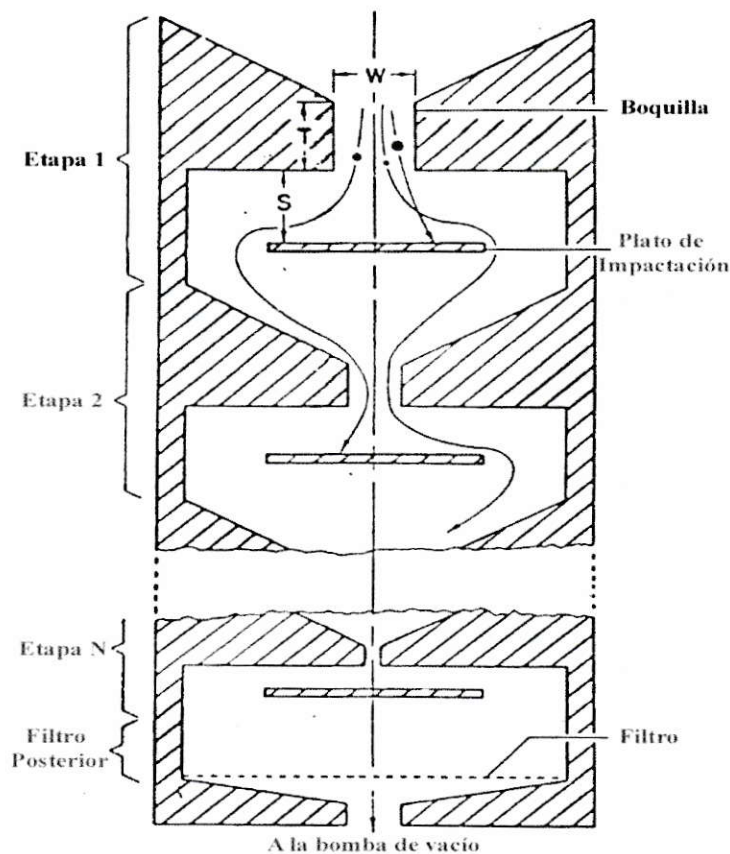


Figura II-2. Esquema de un impactador de cascadas mostrando las trayectorias de tres diferentes tamaños de partículas ⁽¹⁰⁾.

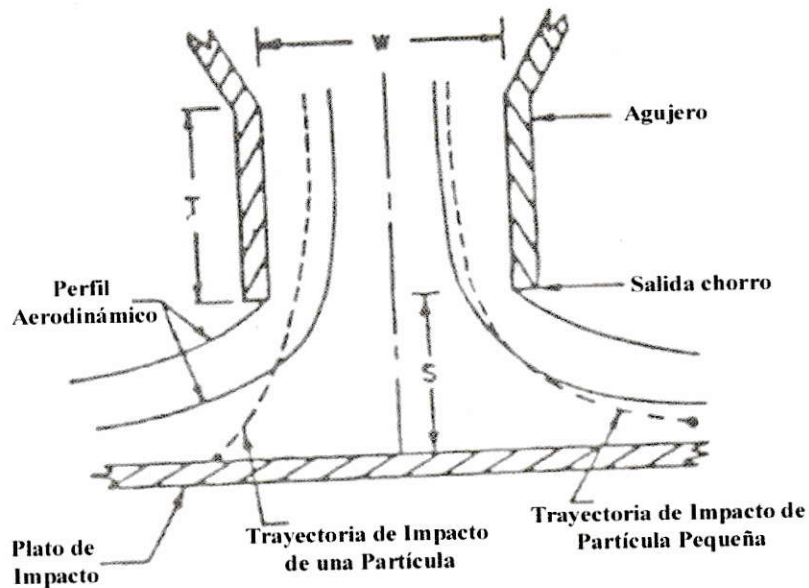


Figura II-3. Esquema de la trayectoria de una partícula en una etapa del impactador MOUDI⁽¹⁰⁾.

El MOUDI está conformado por dos sistemas básicos: el impactador de cascada y el gabinete rotatorio o sistema rotor, el cual produce un depósito uniforme de material particulado sobre la superficie completa del plato de impacto.

El impactador consta de 8 etapas y un filtro posterior con un punto de corte nominal de 18 a 0,10 μm como se muestra en la Tabla II.1. Cada etapa está formada por el plato de impacto intercambiable de la etapa anterior y el plato agujereado de la siguiente etapa. Además de magnetos, anillos de soporte y el cuerpo de cada etapa.

Tabla II-1. Características de las etapas del impactador MOUDI.

Etapa	Diámetro de Partícula Aerodinámico μm	Nº de agujeros	Diámetro de agujeros cm
1	18	1	1,75
2	3,2	10	0,247
3	1,8	20	0,137
4	1,0	40	0,072
5	0,56	80	0,040
6	0,32	900	0,0140
7	0,18	900	0,0090
8	0,10	2000	0,0055
af	< 0,1	---	---

Fuente: MSP Corp ⁽⁸⁾

Una característica importante de una etapa en un impactador es la curva de eficiencia de colección, que se muestra en la Figura II-4, el cual da la fracción de partícula del tamaño colectado. Idealmente un impactador debiera coleccionar todas las partículas grandes de un cierto tamaño y ninguna pequeña.

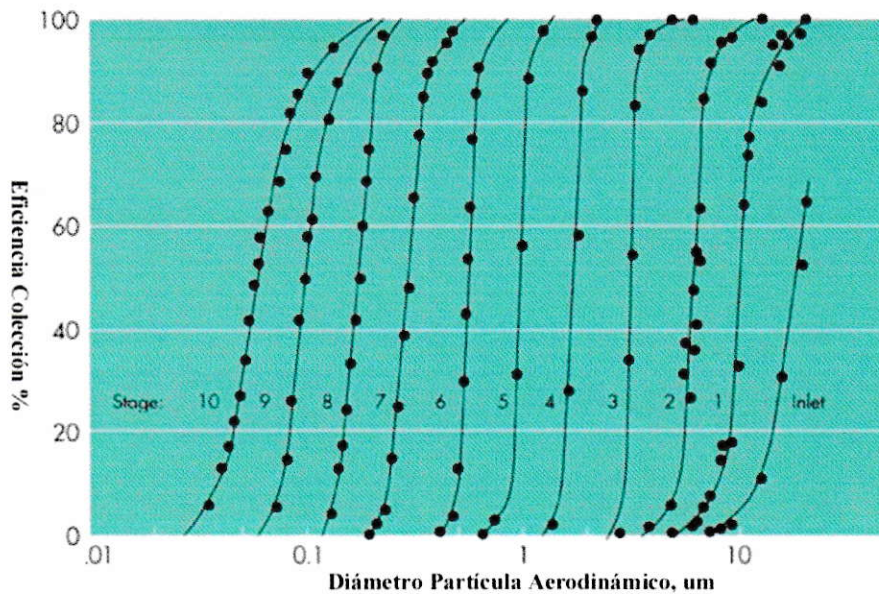


Figura II-4. Curvas de eficiencia características para un impactador de cascada.



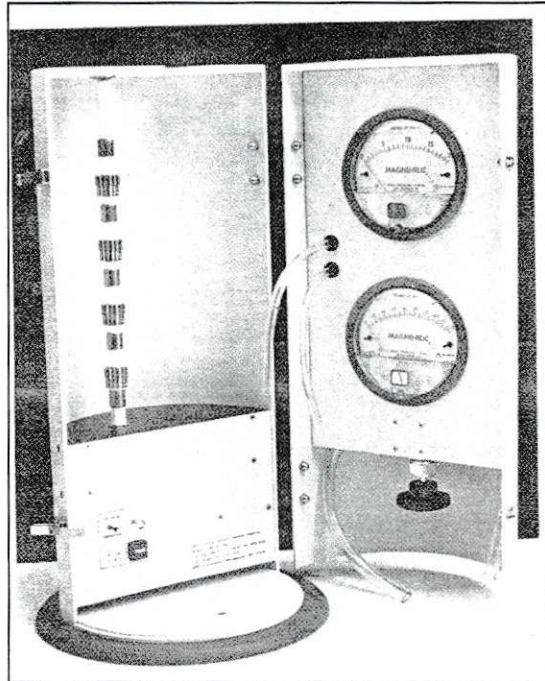


Figura II-5. Gabinete rotatorio o Sistema rotor del muestreador MOUDI.

El rotor contiene una válvula que controla el flujo a través del MOUDI, el cual es de 30 L/min. Consta de dos tomas de presión. La toma de presión superior da la caída de presión en las primeras cinco etapas para indicar la tasa de flujo de aire a través del impactador. El monitor inferior da la caída de presión para las etapas finales, donde se modera la presión necesaria para tamaños de aerosol de submicrones usando agujeros de diámetro muy pequeños, como por ejemplo 2000 agujeros de 55 μm de diámetro en la etapa final con un promedio de flujo final a través del impactador de 30 L/min.

El tipo de sustrato o la superficie de recolección requerida en el MOUDI es principalmente dictado por el tipo de aerosol y el método por el cual el sustrato o depósito será analizado ^(8,15). El análisis químico de las muestras requiere de un sustrato químicamente inerte y con bajo peso como son los filtros de teflón o de cuarzo.

Un problema inherente en los impactadores asociado con la colección de material particulado en las distintas etapas es el rebote de partículas, lo que puede ser solucionado aplicando una superficie pegajosa de aceite o grasa al sustrato. Sin embargo, engrasar el sustrato no es recomendado para el análisis químico de los filtros.

II.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

II.2.1 TOMA DE MUESTRAS

Las campañas de muestreo de material particulado fino se realizaron en la estación de Pudahuel de la Red MACAM ubicada en calle El Lazo 8667 desde el día 15 de mayo al 3 de julio del 2003 realizándose ocho muestreos. Para esto se utilizó un muestreador tipo cascada llamado MOUDI con el cual se puede obtener una distribución por tamaño de las partículas.

Tabla II-2. Condiciones de muestreo efectuados con muestreador MOUDI en la comuna de Pudahuel, Santiago.

Muestreo	Fecha de muestreos	Tiempo de colección, h	Volumen muestreado, m ³
1	15/05/03 al 19/05/03	93,35	136,372
2	19/05/03 al 22/05/03	70,54	57,355
3	29/05/03 al 02/06/03	97,24	128,842
4	02/06/03 al 05/06/03	74,40	98,553
5	12/06/03 al 16/06/03	92,30	134,323
6	16/06/03 al 19/06/03	73,56	104,42
7	26/06/03 al 30/06/03	94,30	133,434
8	30/06/03 al 03/07/03	77,58	104,219

II.2.2 ACONDICIONAMIENTO Y GRAVIMETRÍA DE FILTROS

El análisis gravimétrico de cada superficie de recolección proporciona las fracciones de masa recolectadas en cada etapa o fracción de tamaño. Este se realizó utilizando una balanza analítica Delta Range AT261 con una precisión de 0,01 mg en una cámara de ambientación con temperatura y humedad controlada alrededor de 40% de humedad relativa y 20 °C. El tipo de substrato utilizado fue de teflón PTFE (polytetrafluoroethylene) de 47 mm de diámetro con 0,2 µm de tamaño de poro de la Empresa Advantec MFS Inc., de California, USA.

Los filtros se masaron antes y después de colectar el material particulado después de 24 horas, luego se guardaron los filtros impactados en la oscuridad a 4 °C hasta su tratamiento.

II.2.3 DETERMINACIÓN DE IONES INORGÁNICOS

II.2.3.1 EXTRACCIÓN

La extracción se realizó mediante sonicación de medio filtro de cada etapa con 4 mL de agua desionizada durante 15 min. El extracto se traspasó a viales previa filtración con un filtro de 0,45 µm de tamaño de poro e inyectados a los respectivos cromatógrafos.

II.2.3.2 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis de los aniones y cationes se realizó mediante la ayuda de un cromatógrafo iónico de marca Dionex, modelo DX-120. Las columnas y precolumnas utilizadas para aniones fueron Dionex Ion Pac AS 14 4mm (10-32) y Ion Pac AG 14 4mm (10-32) como precolumna, para cationes una columna Dionex Ion Pac CS 12^a (4*250 mm) (10-32) y precolumna Ion Pac CG 12^a (4*50 mm) (10-32).

II.2.4 DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAHs)

II.2.4.1 EXTRACCIÓN

La metodología de extracción de PAHs se basó en el “Método TO13” recomendado por la USEPA, la cual se muestra en la figura II-6.

Se realizó la extracción soxhlet de los filtros durante 16 h, es decir, se realizaron 48 ciclos de reflujo con diclorometano. Durante la etapa de extracción el material de vidrio se cubrió con papel de aluminio para evitar la degradación de los PAHs con la luz. Luego se realizó la eliminación de humedad de cada etapa con Na₂SO₄ anhidro acondicionado (400 °C) en una columna de separación. A continuación se realizó cambio de solvente a hexano y reducción de volumen en un evaporador rotatorio hasta concentrar aproximadamente 2 mL de muestra. Finalmente el extracto se concentra hasta un volumen de 1 mL con corriente suave de N_{2(g)} y se traspasa a micro viales.

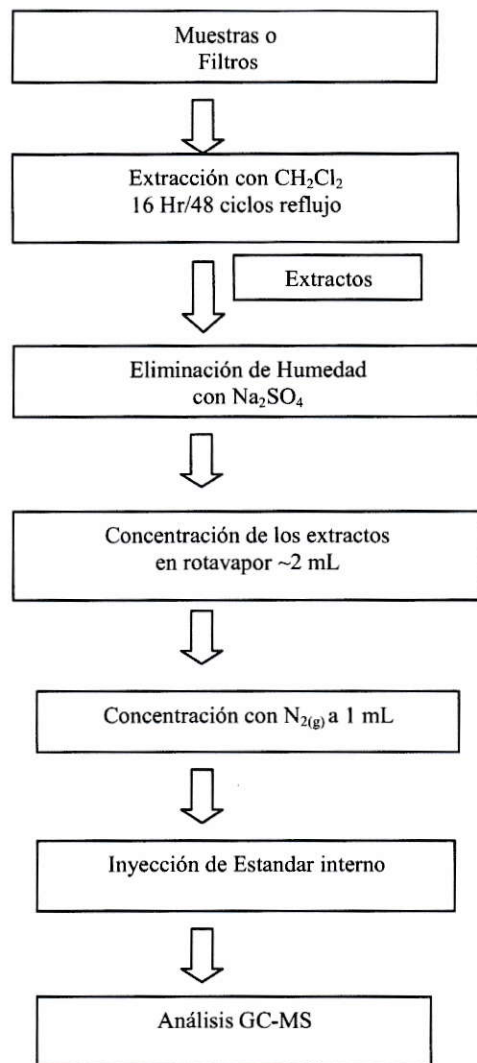


Figura II-6. Metodología de Extracción de PAHs.

II.2.4.2 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis de los PAHs se realizó mediante la ayuda de un cromatógrafo de gases modelo Hewlett Packard 6890 acoplado a un detector de masas selectivo modelo Hewlett Packard 5973.

La columna cromatográfica utilizada fue HP-5MS (Crosslinked 5% PH ME Siloxane) con un film de 0,25 μm de espesor, un largo de 30 m y un diámetro interno de 0,25 mm de marca Hewlett Packard. Se utilizó Helio como gas portador.

Las condiciones cromatográficas fueron:

- inyector automático con temperatura de 270 °C.
- programa de temperatura: 35°C (2 min), 35°C-130°C (20°C/min), 130°C-295°C (10°C/min), 295°C (5 min).
- 2 μL como volumen de inyección de muestra.

Posteriormente, se inyectaron en el GC-MS las extracciones de las muestras de material particulado urbano colectado, para la identificación y cuantificación de los diferentes PAHs.

Los compuestos fueron identificados comparando los tiempos de retención (t_r) y espectros de masa de los estándares con las muestras, y los espectros de masa de cada señal, teniendo éstos que coincidir con los iones fragmentados y con una relación de abundancia de iones en más de un 90%. La cuantificación se realizó en el modo Single Ion Method (SIM) teniendo en cuenta los iones moleculares y las curvas de calibración para cada compuesto analizado. En la Tabla II-3 se muestran los iones moleculares y secundarios de los distintos PAHs.

Tabla II-3. Iones característicos para la detección por GC-MS de PAHs.

PAH	Fórmula Empírica	ION Principal	ION Secundario
Antraceno	C ₁₄ H ₁₀	178	176
Acenafteno	C ₁₂ H ₁₀	154	153
Acenaftileno	C ₁₂ H ₈	152	151
Benzo(a)antraceno	C ₁₈ H ₁₂	228	226
Benzo(a)pireno	C ₂₀ H ₁₂	252	250
Benzo(b)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	252	250
Benzo(k)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	252	253
Benzo(g,h,i)perileno	C ₂₂ H ₁₂	276	277
Dibenzo(a,h)antraceno	C ₂₂ H ₁₄	278	279
Fenantreno	C ₁₄ H ₁₀	178	176
Fluoranteno	C ₁₆ H ₁₀	202	200
Fluoreno	C ₁₃ H ₁₀	166	165
Indeno(1,2,3-cd)pireno	C ₂₂ H ₁₂	276	277
Criseno	C ₁₈ H ₁₂	228	226
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	128	127
Pireno	C ₁₆ H ₁₀	202	200

CAPÍTULO III RESULTADOS OBTENIDOS

III.1 ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE MUESTREO

Para poder verificar la metodología de muestreo utilizada se obtuvieron los datos del Índice de Calidad de Aire referido a Partículas (ICAP) del SESMA valores obtenidos a través del muestreador TEOM, equipo que recolecta la masa de material particulado de 10 μm (PM10) en la Estación de Pudahuel. Estos valores serán comparados con la masa total recolectada por el equipo MOUDI del 15 de mayo al 19 de junio 2003. En la Tabla III-1 y en la Figura III-1 se presentan los datos obtenidos.

Tabla III-1. ICAP promedios y concentraciones de masa obtenidas con MOUDI en Pudahuel. (*)

Nº muestreo	Fecha Muestreo	ICAP promedio	MOUDI $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	15/05/03-19/05/03	153,08	106,04 \pm 0,219
2	19/05/03-22/05/03	84,48	77,75 \pm 0,523
3	29/05/03-02/06/03	107,18	103,08 \pm 0,232
4	02/06/03-05/06/03	66,08	65,74 \pm 0,304
5	12/06/03-16/06/03	39,28	36,47 \pm 0,223
6	16/06/03-19/06/03	74,59	83,51 \pm 0,287

(*) Las tablas de datos de ICAP hora por muestreo se presentan en el Anexo A.

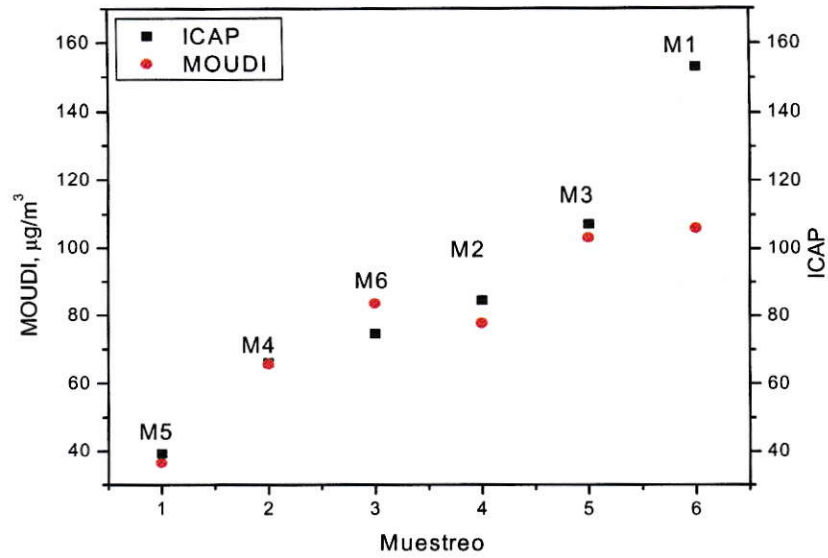


Figura III-1. ICAP promedio y concentraciones totales obtenidas por el muestreador MOUDI en la estación de Pudahuel.

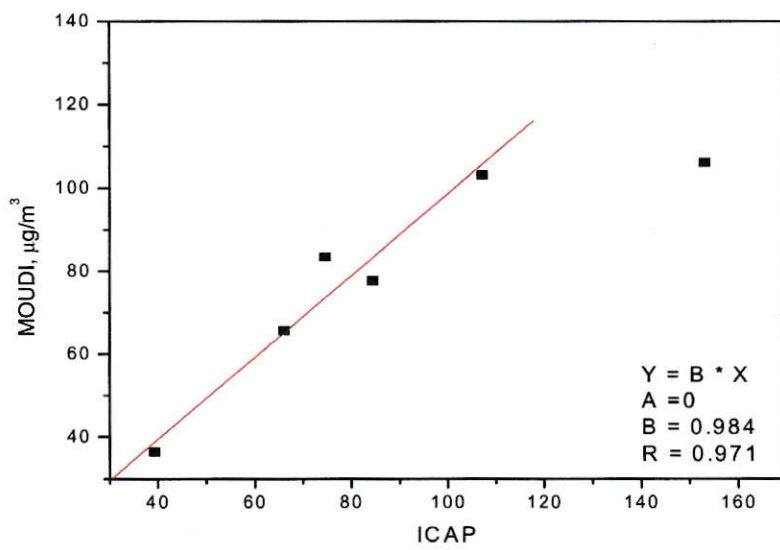


Figura III-2. Correlación concentraciones MOUDI v/s ICAP promedio.

III.2 ESTUDIO DE LAS CONTRIBUCIONES DE MATERIAL PARTICULADO

Las contribuciones diarias de material particulado se estudiarán según las concentraciones por hora de los episodios ambientales ocurridos entre el 15/06 al 19/06 2003 en la Estación de la Red MACAM en Pudahuel, datos entregados por el Centro Nacional del Medio Ambiente, CENMA. En la Tabla III-2 se presentan las fechas de muestreo y los episodios normales, de alerta y pre-emergencia ocurridos en el período de muestreo.

Tabla III-2. Fechas de muestreo de material particulado y los Episodios Ambientales entre los días 15/05/03 al 19/06/03 en la Estación de Monitoreo de la Red MACAM de Pudahuel.

Muestreo	Fecha de muestreos	Tiempo de colección , h	Volumen muestreado, m ³	Episodio Ambiental
1	15/05/03 al 19/05/03	93,35	136,372	Pre-Emergencia 19/05/03
2	19/05/03 al 22/05/03	70,54	57,355	Normal
3	29/05/03 al 02/06/03	97,24	128,842	Alerta 1/06/03
4	02/06/03 al 05/06/03	74,40	98,553	Normal
5	12/06/03 al 16/06/03	92,30	134,323	Normal
6	16/06/03 al 19/06/03	73,56	104,420	Normal

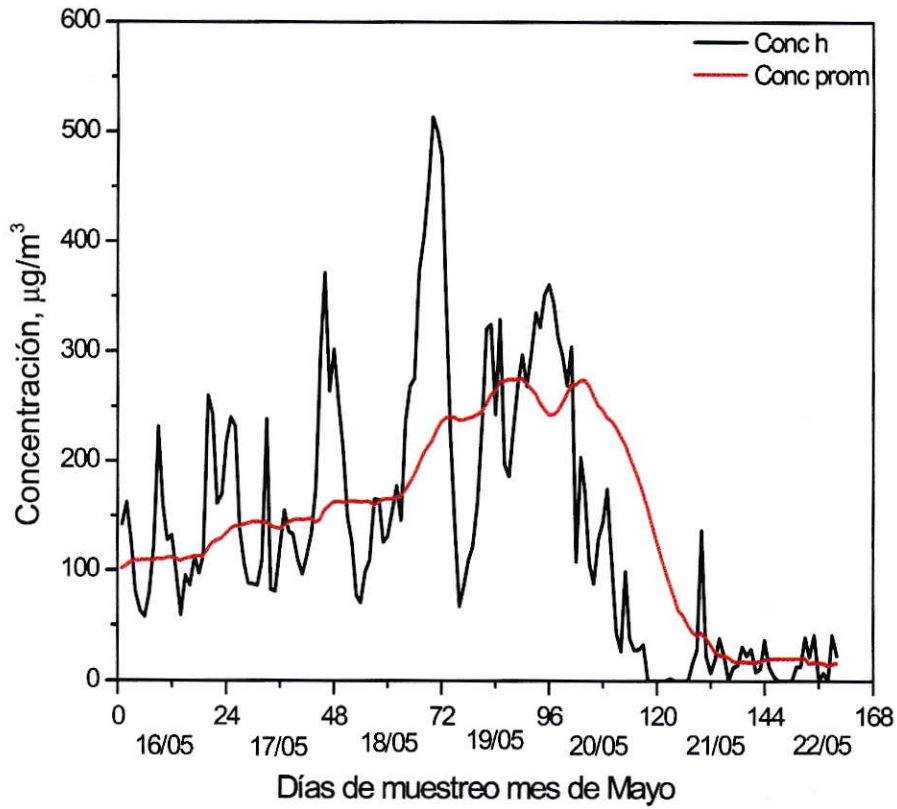


Figura III-3. Concentraciones diarias de material particulado por equipo TEOM de la Red MACAM en Pudahuel del 16 al 22 de Mayo 2003. Fuente CENMA.

Conc h: Concentración de PM por hora, Conc prom: Concentración de PM promedio

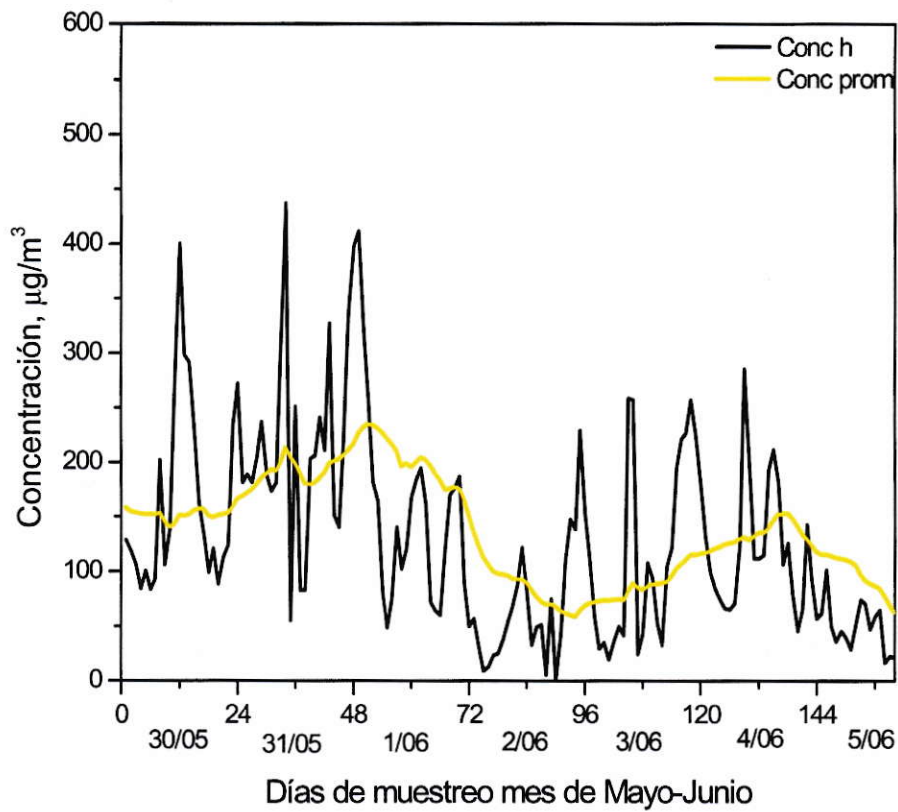


Figura III-4. Concentraciones diarias de material particulado con equipo TEOM de la Red MACAM en Pudahuel del 30 de Mayo al 5 de Junio 2003. Fuente CENMA.

Conc h: Concentración de PM por hora, Conc prom: Concentración de PM promedio

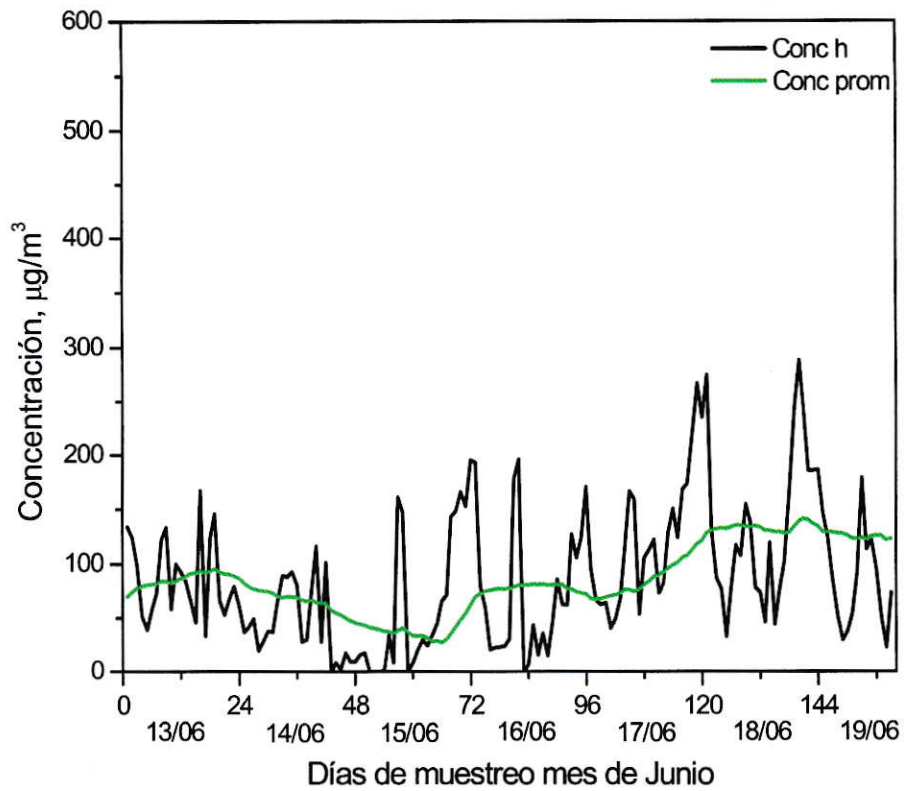


Figura III-5. Concentración diaria de material particulado por equipo TEOM en la estación de la Rd MACAM en Pudahuel del 13 al 19 de Junio 2003. Fuente CENMA.

Conc h: Concentración de PM por hora, Conc prom: Concentración de PM promedio.

III.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Para el estudio del material particulado presente en la atmósfera es necesario conocer las condiciones meteorológicas en el sitio de muestreo.

A continuación se presentan las condiciones meteorológicas de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en la comuna de Pudahuel. Fuente: CENMA.

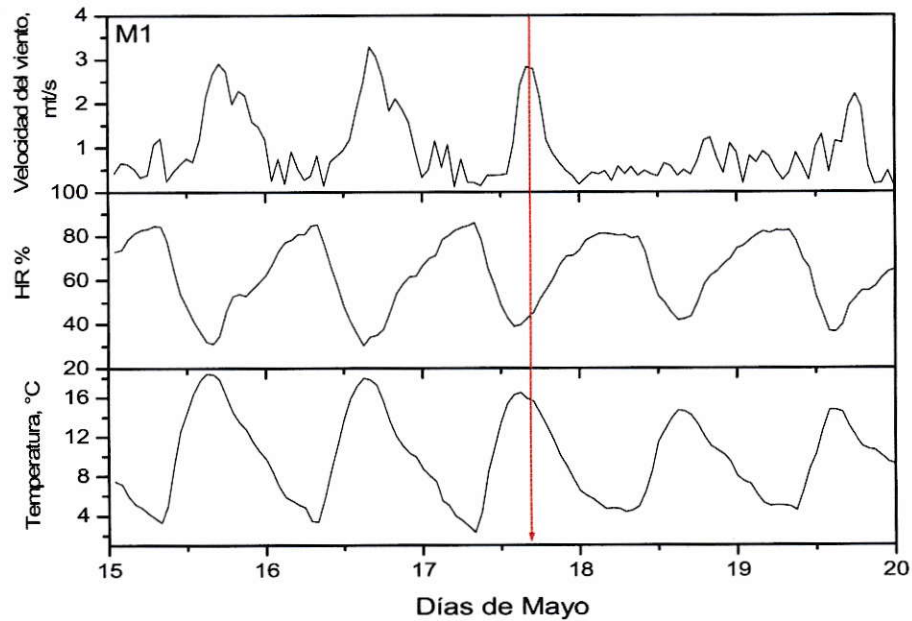


Figura III-6. Condiciones Meteorológicas entre el 15 al 19 de Mayo 2003, M1.

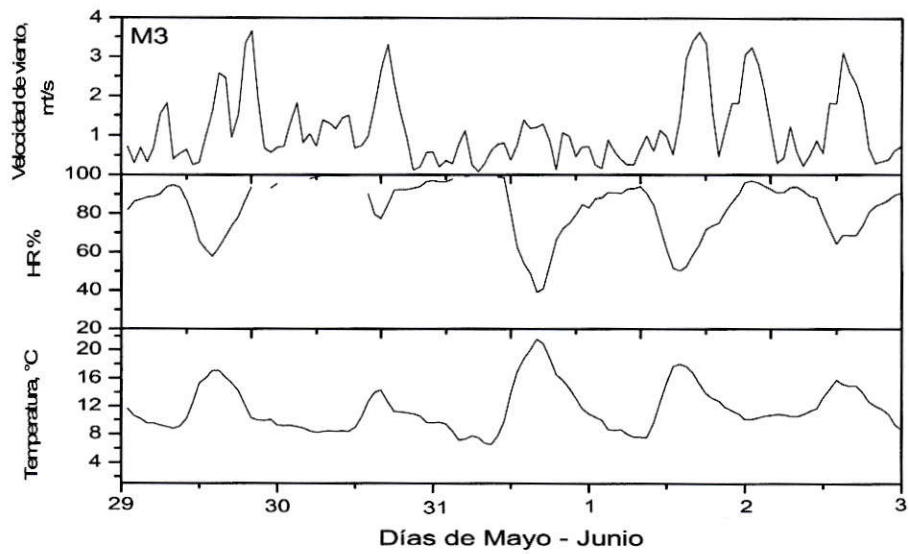


Figura III-7. Condiciones Meteorológicas del 29 de Mayo al 2 de Junio 2003, M3.

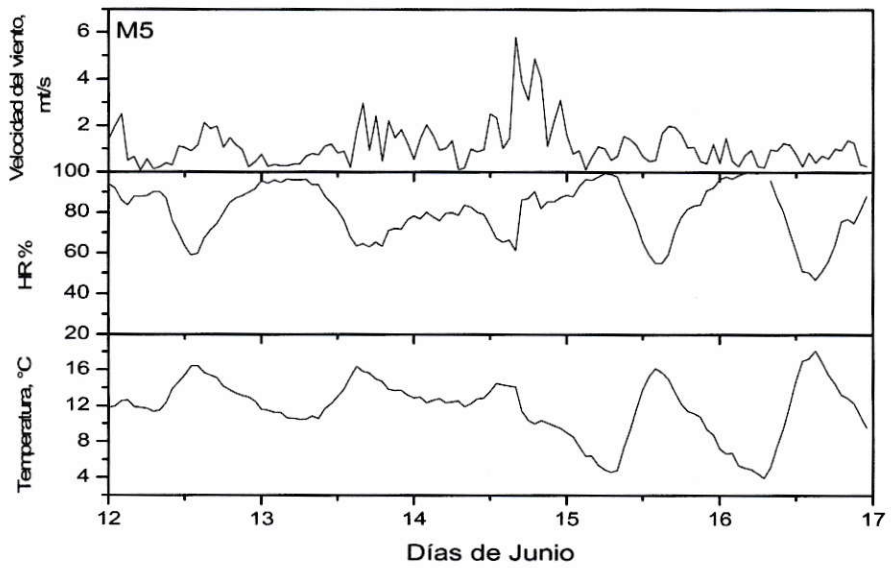


Figura III-8. Condiciones Meteorológicas del 12 al 16 de Junio 2003, M5.

III.4 GRAVIMETRÍA

Los resultados obtenidos en el estudio de Gravimetría realizado en la Estación de la Red MACAM en Pudahuel se presentan en la Tabla III-3 donde se muestran las Distribuciones de Masa recolectadas de las diferentes fracciones de material particulado para los muestreos entre el 15 de mayo al 19 de junio del 2003.



Figura III-9. Filtros obtenidos a través del muestreador MOUDI en la Estación de la Red MACAM en Pudahuel.

Nota: En el muestreo N°7 y N°8, desde el 26/06 al 03/07 del 2003, no se obtuvo una buena rotación del equipo, por lo que se descartan para el análisis de datos.

Tabla III-3. Masa recolectada de las distintas fracciones de material particulado.

Muestreo	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Fecha de muestreo	15/05-19/05	19/05-22/05	29/05-2/06	2/06-5/06	12/06-16/06	16/06-19/06
Dp ^a µm	Masa recolectada mg ±0,03mg	Masa recolectada mg ±0,03mg	Masa recolectada mg ±0,03mg	Masa recolectada mg ±0,03mg	Masa recolectada mg±0,03mg	Masa recolectada mg±0,03mg
< 0,1	0,5	0,19	0,32	0,29	0,28	0,37
0,1	1,84	0,35	0,68	0,42	0,60	0,53
0,18	0,94	0,23	0,44	0,21	0,26	0,22
0,32	2,72	0,87	1,92	0,79	0,95	1,47
0,56	2,51	1,28	3,78	1,25	0,61	2,02
1,0	0,87	0,37	3,19	1,8	0,29	0,66
1,8	0,75	0,26	0,95	0,41	0,28	0,48
3,2	4,05	0,65	1,61	0,85	1,27	2,20
18	0,69	0,26	0,39	0,46	0,36	0,77

^a Dp: Diámetro de Partícula Aerodinámico

A continuación se procedió a obtener la concentración ambiental de las muestras, las que se pueden observar en la Tabla III-4 y en las Figuras III-10 y III-11.

Tabla III-4. Concentraciones Ambientales de Material Particulado según Diámetro de Partícula Aerodinámico entre el 15/05/03 al 19/06/03.

Muestreo	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Fecha de muestreo	15/05-19/05	19/05-22/05	29/05-02/06	02/06-05/06	12/06-16/06	16/06-19/06
Episodio	Pre-Emergencia 19/05/03	Normal	Alerta 01/06/03	Normal	Normal	Normal
Dp ^a µm	C.A. ^b µg/m ³ ± 0,219	C.A. µg/m ³ ± 0,523	C.A. µg/m ³ ± 0,232	C.A. µg/m ³ ± 0,304	C.A. µg/m ³ ± 0,223	C.A. µg/m ³ ± 0,287
< 0,1	3,66	3,31	2,48	2,94	2,08	3,54
0,1	13,49	6,10	5,28	4,26	4,47	5,08
0,18	6,89	4,01	3,42	2,13	1,94	2,11
0,32	19,95	15,17	14,90	8,02	7,07	14,08
0,56	18,41	22,32	29,34	12,68	4,54	19,34
1,0	6,38	6,45	24,76	18,26	2,16	6,32
1,8	5,50	4,53	7,37	4,16	2,08	4,60
3,2	29,70	11,33	12,50	8,62	9,45	21,07
18	5,06	4,53	3,03	4,67	2,68	7,37

^a Dp: Diámetro de partícula Aerodinámico, ^b C.A.: Concentración Ambiental

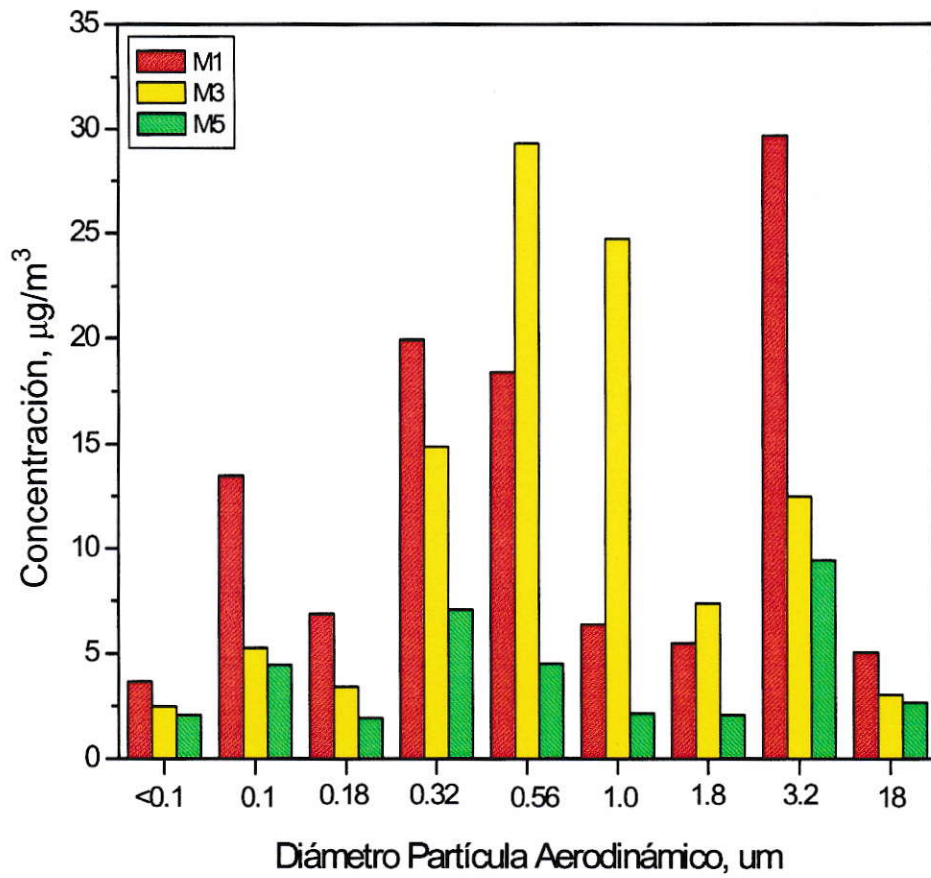


Figura III-10. Distribución de concentraciones ambientales vs el Diámetro de Partícula Aerodinámico de los episodios con Pre-Emergencia M1, Alerta M3 y Normal M5 en la Estación de Pudahuel.

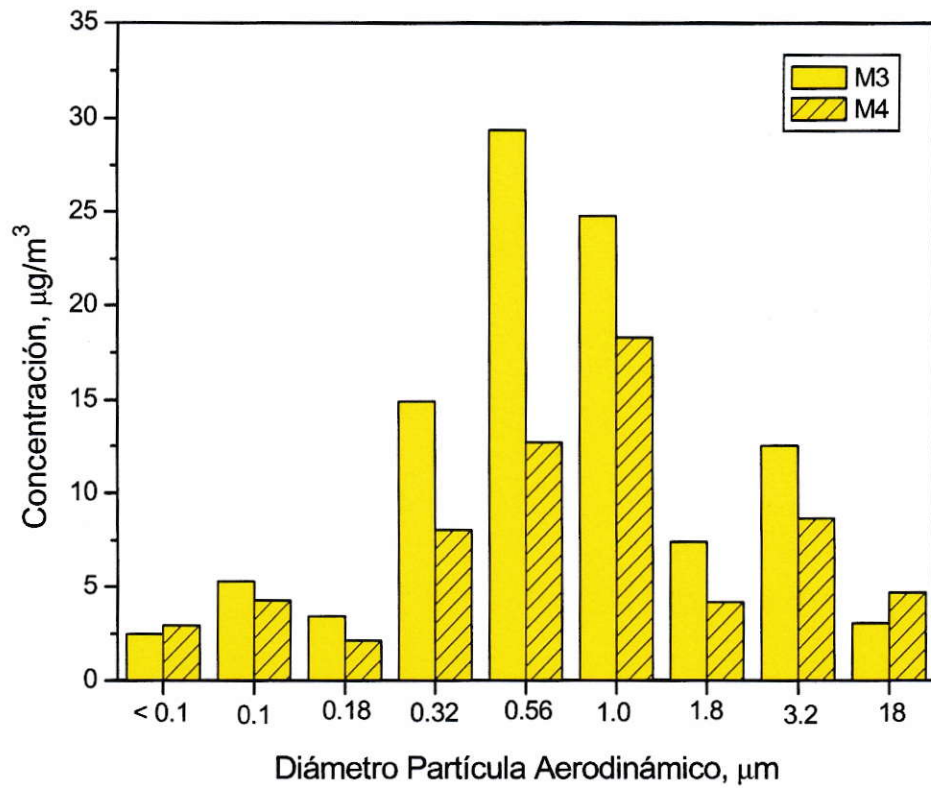


Figura III-11. Distribución de concentraciones ambientales vs Diámetro de Partícula Aerodinámico de los episodios de Alerta M3 y la caída de Alerta M4 en Pudahuel.

III.5 ANIONES

Los aniones que se analizaron por Cromatografía Iónica fueron nitratos, sulfatos, cloruros y fluoruro, encontrándose éste último bajo el límite de detección analítico. Los límites de detección analíticos para cada anión son los siguientes:

Tabla III-5. Límites de detección analíticos para aniones

Anión	Límite de Detección ppm
Cloruro	0,079
Sulfato	0,132
Nitrato	0,113
Fluoruro	0,051

En las siguientes tablas se presentan las concentraciones ambientales obtenidas para cloruro, sulfato y nitrato entre el 15 de mayo al 19 de junio del 2003.

Tabla III-6. Concentraciones de Cloruro vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.

Cloruro Dp ^a , µm	M1-M2 15/05-22/05		M3-M4 29/05-05/06		M5-M6 12/06-19/06	
	C.A. ^b µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
0,1	< L.D.	< L.D.	0,014	0,39	0,002	0,05
0,18	< L.D.	< L.D.	0,013	0,36	0,003	0,08
0,32	0,016	0,45	0,052	1,46	0,022	0,62
0,56	0,105	2,96	0,137	3,86	0,046	1,29
1,0	0,019	0,53	0,082	2,31	0,012	0,33
1,8	0,020	0,56	0,005	0,14	0,010	0,28
3,2	0,126	3,55	0,027	0,76	0,067	1,88
18	0,008	0,22	0,019	0,53	0,003	0,08

^a Dp: Diámetro Partícula Aerodinámico, ^b C.A.:Concentración Ambiental, < L.D.: Bajo límite de detección analítico

Tabla III-7. Concentraciones de Sulfato vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel

Sulfato	M1-M2 15/05-22/05		M3-M4 29/05-05/06		M5-M6 12/06-19/06	
Dp ^a , μm	C.A. ^b μg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. μg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. μg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	0,06	1,25	0,06	1,25	0,03	0,62
0,1	0,10	2,08	0,128	2,66	0,07	1,45
0,18	0,08	1,66	0,103	2,14	0,02	0,41
0,32	0,50	10,41	0,372	3,87	0,25	5,20
0,56	0,37	7,70	1,802	37,54	0,30	6,25
1,0	0,15	3,12	1,611	33,56	0,07	1,45
1,8	<L.D.	<L.D.	0,101	2,10	0,02	0,41
3,2	0,20	4,16	0,230	4,79	0,08	1,66
18	0,01	0,20	0,084	1,75	0,01	0,20

^a Dp: Diámetro Partícula Aerodinámico, ^b C.A.:Concentración Ambiental, < L.D.: Bajo límite de detección analítico

Tabla III-8. Concentraciones de Nitrato vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.

Nitrato	M1-M2 15/05-22/05		M3-M4 29/05-05/06		M5-M6 12/06-19/06	
Dp ^a , μm	C.A. ^b μg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. μg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. μg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	0,05	0,79	0,021	0,33	0,02	0,32
0,1	0,11	1,77	0,245	3,95	0,07	1,12
0,18	0,14	2,25	0,236	3,80	0,06	0,96
0,32	1,43	23,06	1,325	21,37	0,50	8,06
0,56	2,33	37,58	6,319	101,91	1,08	17,41
1,0	0,63	1,01	4,230	68,22	0,21	3,38
1,8	0,17	2,74	0,242	3,91	0,11	1,77
3,2	0,44	7,09	0,322	5,19	0,18	2,90
18	0,02	0,32	0,079	1,27	0,01	0,16

^a Dp: Diámetro Partícula Aerodinámico, ^b C.A.:Concentración Ambiental

A continuación se presentan las figuras correspondientes para cloruro, sulfato y nitratos en Pudahuel.

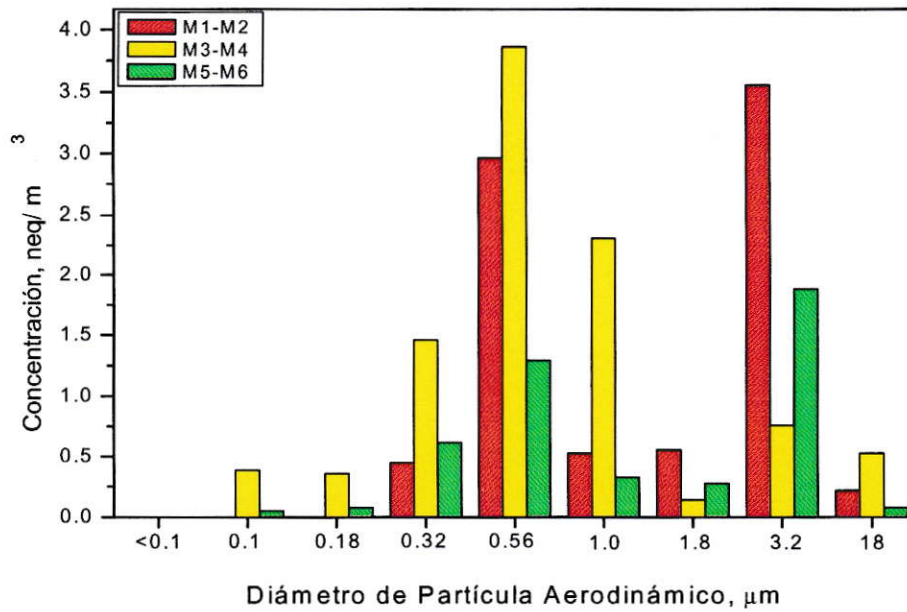


Figura III-12. Concentración de Cloruro vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

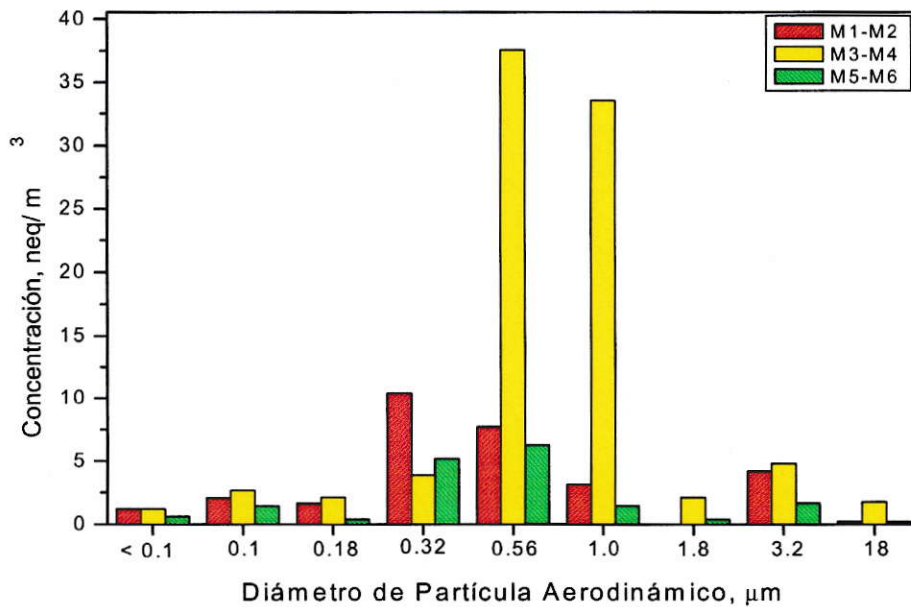


Figura III-13. Concentración de Sulfato vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

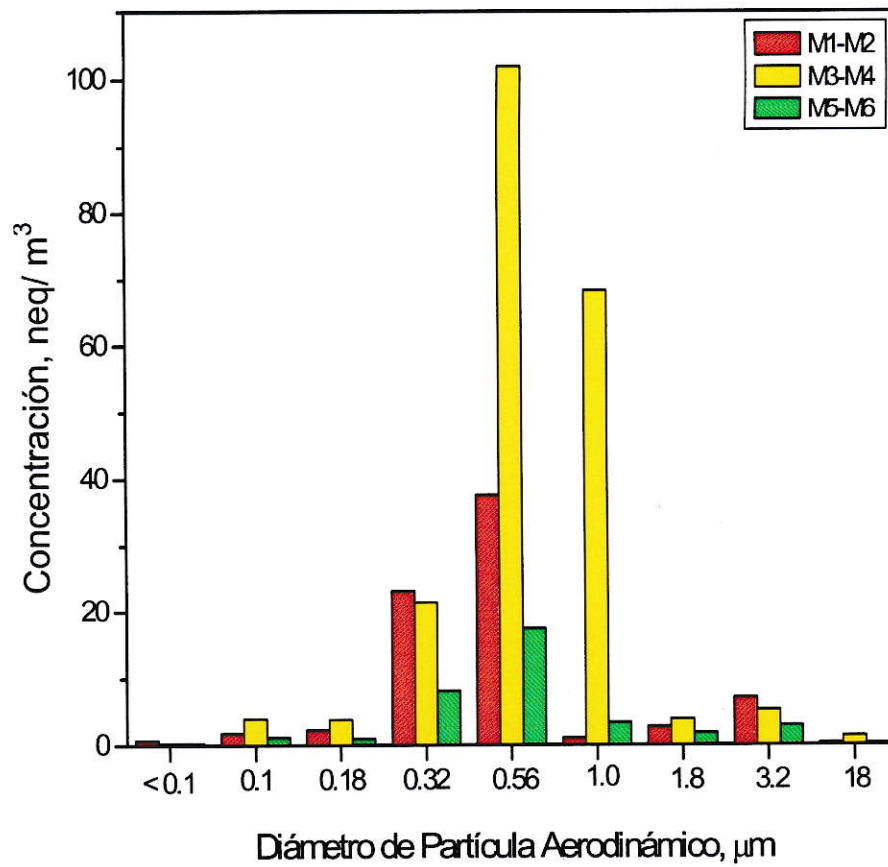


Figura III-14. Concentración de Nitrato vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

III.6 CATIONES

Los cationes que se analizaron por Cromatografía Iónica fueron amonio, calcio, potasio y magnesio, encontrándose éste último bajo el límite de detección analítico. Para los demás cationes estudiados los límites de detección analíticos encontrados fueron los siguientes:

Tabla III-9. Límites de detección analíticos para cationes analizados.

Catión	Límite de Detección ppm
Amonio	0,056
Calcio	0,034
Potasio	0,122
Magnesio	0,024

En las siguientes tablas se presentan las concentraciones ambientales obtenidas para amonio, calcio y potasio entre el 15 de mayo al 19 de junio del 2003.

Tabla III-10. Concentraciones de Amonio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.

Amonio	M1-M2	15/05-22/05	M3-M4	29/05-05/06	M5-M6	12/06-19/06
Dp ^a , µm	C.A. ^b µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	0,013	0,72	0,010	0,55	0,010	0,55
0,1	0,086	4,77	0,044	2,44	0,030	1,66
0,18	0,086	4,77	0,045	2,5	0,019	1,05
0,32	0,393	21,83	0,354	19,66	0,157	8,72
0,56	0,506	28,11	1,467	81,5	0,276	15,33
1,0	0,112	6,22	1,099	61,05	0,039	2,16
1,8	0,012	0,66	0,028	1,55	0,005	2,16
3,2	0,029	1,61	0,013	0,72	0,010	0,55
18	< L.D.	< L.D.	0,002	0,11	0,002	0,11

^aDp : Diámetro Partícula Aerodinámico, ^bC.A.:Concentración Ambiental, < L.D.: Bajo límite de detección analítico

Tabla III-11. Concentraciones de Calcio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.

Calcio	M1-M2 15/05-22/05		M3-M4 29/05-05/06		M5-M6 12/06-19/06	
	C.A. ^b µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	0,019	0,94	0,005	0,24	< L.D.	0,19
0,1	0,010	0,45	0,009	0,45	< L.D.	< L.D.
0,18	0,014	0,69	0,005	0,24	< L.D.	< L.D.
0,32	0,053	2,64	0,014	0,69	0,005	0,24
0,56	0,051	2,54	0,081	4,04	0,014	0,69
1,0	0,137	6,83	0,066	3,29	0,017	0,84
1,8	0,110	5,49	0,142	7,08	0,035	1,74
3,2	0,378	18,86	0,238	11,87	0,186	9,28
18	0,061	3,04	0,140	6,98	0,037	1,84

^aDp: Diámetro Partícula Aerodinámico, ^bC.A.:Concentración Ambiental, < L.D.: Bajo límite de detección analítico

Tabla III-12. Concentraciones de Potasio vs Diámetro de Partícula en la estación de Pudahuel.

Potasio	M1-M2 15/05-22/05		M3-M4 29/05-05/06		M5-M6 12/06-19/06	
	C.A. ^b µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³	C.A. µg/m ³	C.A. neq/m ³
< 0,1	0,071	1,81	0,012	0,30	0,013	0,33
0,1	0,113	2,89	0,028	0,71	0,027	0,69
0,18	0,080	2,04	0,019	0,48	0,003	0,07
0,32	0,202	5,16	0,098	2,50	0,070	1,79
0,56	0,160	4,09	0,137	3,50	0,083	2,12
1,0	0,051	1,30	0,076	1,94	0,011	0,28
1,8	0,030	0,76	0,017	0,43	0,004	0,10
3,2	0,045	1,15	0,015	0,38	0,007	0,17
18	0,009	0,23	0,013	0,33	0,006	0,15

^aDp: Diámetro Partícula Aerodinámico, ^bC.A.:Concentración Ambiental, < L.D.: Bajo límite de detección analítico

A continuación se presentan los gráficos correspondientes para amonio, calcio y potasio en Pudahuel.

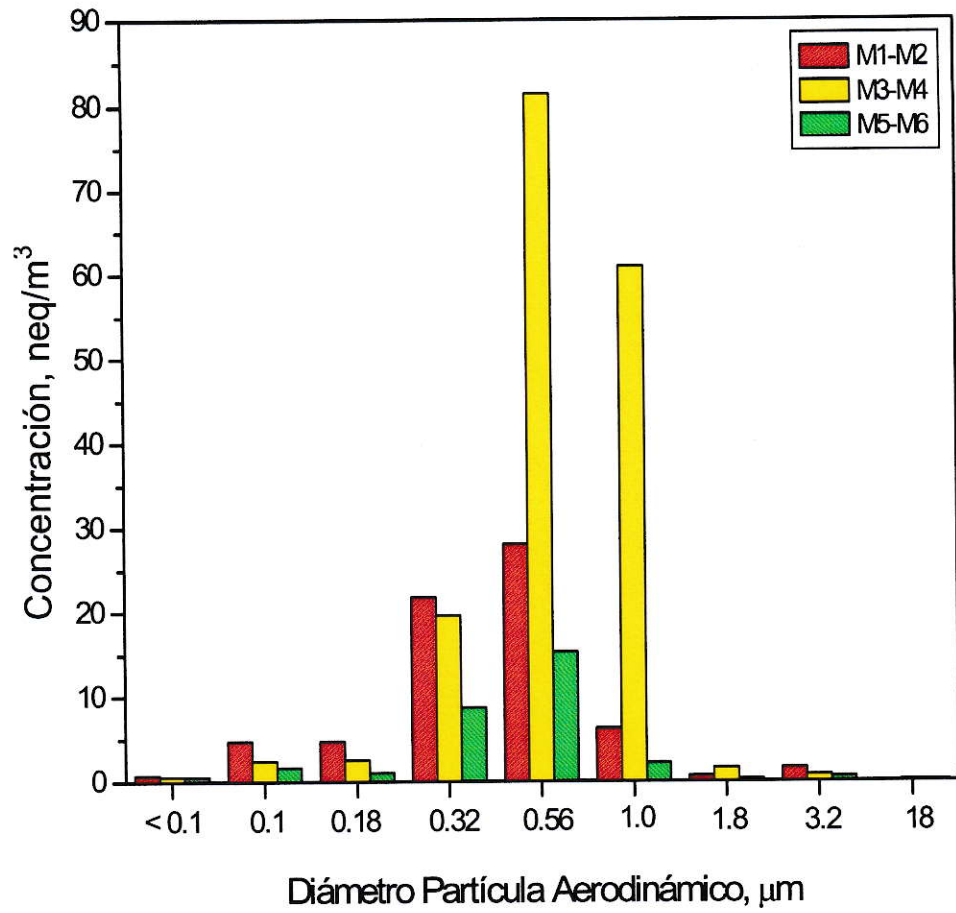


Figura III-15. Concentración de Amonio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

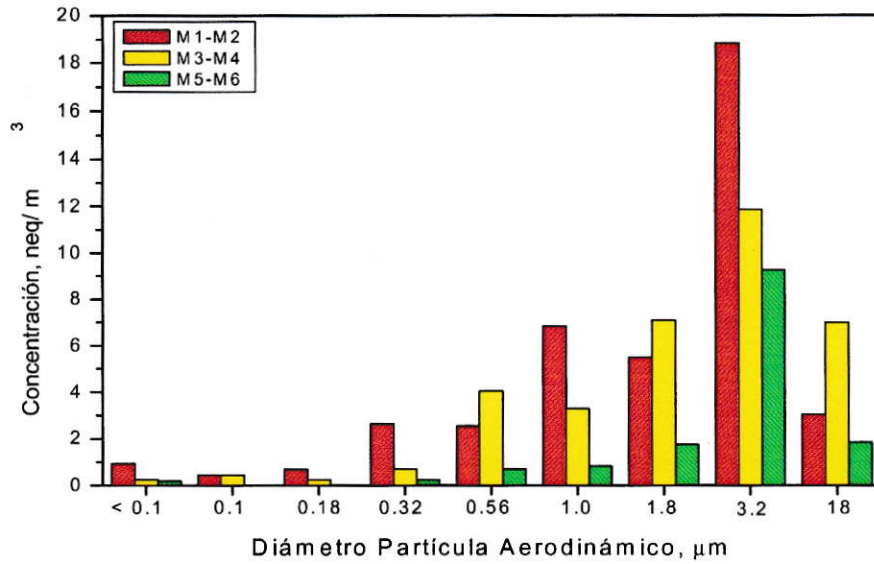


Figura III-16. Distribución de Calcio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

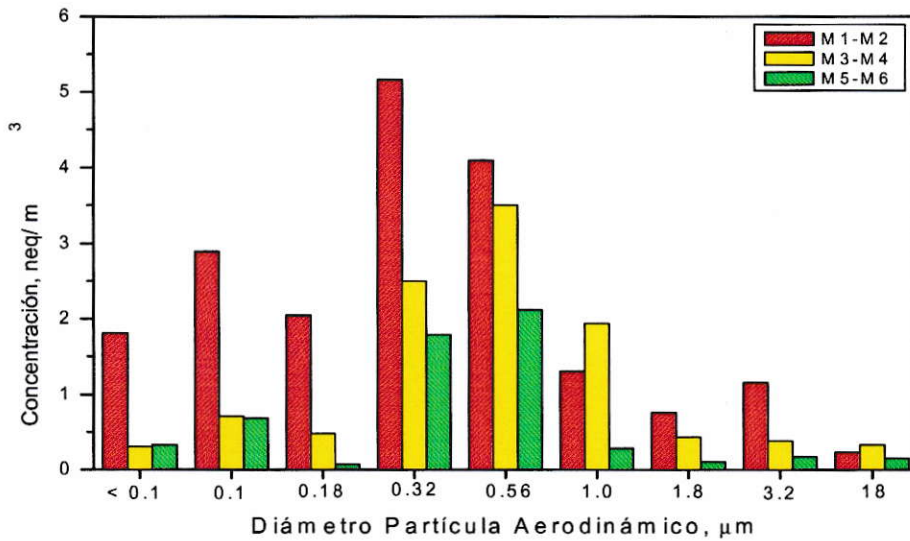


Figura III-17. Distribución de Potasio vs Diámetro de Partícula Aerodinámico.

III.7 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS

Para el estudio de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos se estudiaron 16 compuestos clasificados por la EPA como prioritarios y 7 de ellos clasificados con una posible actividad cancerígena.

En la metodología analítica utilizada para la extracción de compuestos PAHs se obtuvo un porcentaje de recuperación del 75% con un número de ocho muestras y un coeficiente de variación de 2,99 para el compuesto fenantreno d-10.

Las curvas de calibración para cada compuesto se obtuvieron a través de multiestándar de PAHs. El límite de detección analítico para cada uno de los compuestos analizados se obtuvo a través de un número de 10 muestras, siendo éste 3 veces la desviación estándar de las mediciones. Estos parámetros se muestran en la Tabla III-13.

Los compuestos Benzo(b)fluoranteno y Benzo(k)fluoranteno no pudieron ser cuantificados en forma independientes por esta técnica, ya que presentaron tiempos de retención similares. Es por esto que su cuantificación se realizó en forma conjunta. Sin embargo, para su cuantificación en las Figuras III-18 a la III-20, se tomó una concentración promedio de ambos ya que presentan alturas de pico equivalentes.

Se usará abreviatura para los nombres de los distintos PAHs como sigue: Naftaleno (NAP), Acenaftileno (ACE), Acenafteno (ACN), Fluoreno (FLN), Fenantreno (PHE), Antraceno (ANT), Fluoranteno (FL), Pireno (PY), Benzo(a)antraceno (BaA), Criseno (CHR), Benzo(b)fluoranteno (BbF) y Benzo(k)fluoranteno (BkF), Benzo(a)pireno (BaP), Indeno(1,2,3-cd)pireno (IND), Dibenzo(a,h)antraceno (DBA), Benzo(g,h,i)perileno (BghiP).

Tabla III-13. Curvas de calibración y Límites de detección de PAHs.

Compuesto	Tiempo de retención min	Curva de calibración	Coefficiente de correlación r^2	Límite de detección ppb
Naftaleno	7,15	$Y=1,27 \times 10^4 \times X - 7,85 \times 10^4$	1,0	1,482
Acenaftileno	9,65	$Y=1,40 \times 10^4 \times X - 3,43 \times 10^5$	0,999	0,436
Acenafteno	9,98	$Y=8,02 \times 10^3 \times X - 6,68 \times 10^4$	1,0	0,336
Fluoreno	10,988	$Y=9,47 \times 10^3 \times X - 1,79 \times 10^4$	1,0	0,351
Fenantreno	13,01	$Y=3,253 \times X - 0,047$	0,999	0,282
Antraceno	13,12	$Y=3,931 \times X - 0,012$	0,999	0,147
Fluoranteno	15,73	$Y=1,64 \times 10^4 \times X - 3,53 \times 10^4$	0,999	0,655
Pireno	16,21	$Y=1,58 \times 10^4 \times X - 1,28 \times 10^4$	0,999	0,963
Benzo(a)antraceno	19,08	$Y=1,37 \times 10^4 \times X - 2,73 \times 10^4$	0,998	1,803
Criseno	19,17	$Y=1,73 \times 10^4 \times X - 7,43 \times 10^3$	0,998	2,661
Benzo(b)fluoranteno y Benzo(k)fluoranteno	21,4	$Y=4,352 \times X - 0,1627$	0,999	4,675
Benzo(a)pireno	22,06	$Y=4,647 \times X - 0,094$	0,999	2,922
Indeno(1,2,3,cd)pireno	24,30	$Y=1,54 \times 10^4 \times X - 4,03 \times 10^4$	0,997	3,831
Dibenzo(a,h)antraceno	24,39	$Y=1,73 \times 10^4 \times X - 5,37 \times 10^4$	0,999	0,615
Benzo(g,h,i)perileno	24,83	$Y=2,05 \times 10^4 \times X - 4,48 \times 10^4$	0,999	4,686

A continuación en las Tablas III-14 a la III-16 se presentan las concentraciones ambientales de PAHs encontradas en las distintas fracciones de los muestreos realizados en Pudahuel por diámetro de partícula.

Tabla III-14. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 15/05/03 al 22/05/03.

Dp ^a , um	0,1	0,18	0,32	0,56	1,0	1,8	3,2	18
Compuesto	C.A. ^b ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³
NAP	< L.D.	0,012	0,059	< L.D.	< L.D.	0,011	0,029	0,067
ACE	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
ACN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FLN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
PHE	0,03	0,013	0,055	0,025	0,007	0,004	0,005	0,008
ANT	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FL	0,052	0,025	0,083	0,067	0,019	0,007	0,012	0,011
PY	0,085	0,043	0,133	0,108	0,031	0,016	0,023	0,019
BaA	0,143	0,076	0,284	0,208	0,062	0,025	0,023	0,02
CHR	0,183	0,09	0,308	0,233	0,068	0,022	0,028	0,017
BbF y BkF	0,622	0,302	0,732	0,474	0,12	0,039	0,044	0,027
BaP	0,331	0,154	0,416	0,245	0,052	0,014	< L.D.	< L.D.
INP	0,431	0,195	0,552	0,307	0,055	0,01	0,006	< L.D.
DBA	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
BghiP	0,469	0,177	0,438	0,263	0,046	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Σ PAHs	2,346	1,087	3,06	1,93	0,46	0,148	0,17	0,169

^aDp: Diámetro de Partícula Aerodinámico, ^bC.A.: Concentración Ambiental, < L.D.: bajo del limite de detección

analítico

Tabla III-15. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 29/05/03 al 05/06/03.

Dp ^a , um	0,1	0,18	0,32	0,56	1,0	1,8	3,2	18
Compuesto	C.A. ^b ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³
NAP	0,01	0,003	0,01	0,014	0,01	0,004	0,01	< L.D.
ACE	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
ACN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FLN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
PHE	0,016	0,004	0,017	0,023	0,011	0,001	0,002	< L.D.
ANT	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FL	0,021	0,007	0,026	0,036	0,018	0,003	0,004	0,002
PY	0,035	0,015	0,041	0,054	0,03	0,008	0,011	< L.D.
BaA	0,057	0,032	0,102	0,146	0,057	0,014	0,018	0,012
CHR	0,068	0,029	0,112	0,166	0,064	0,009	0,012	< L.D.
BbF y BkF	0,244	0,117	0,429	0,506	0,173	0,044	0,033	0,027
BaP	0,13	0,044	0,175	0,211	0,061	< L.D.	< L.D.	< L.D.
INP	0,17	0,064	0,25	0,292	0,083	0,005	< L.D.	< L.D.
DBA	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
BghiP	0,208	0,064	0,216	0,252	0,083	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Σ PAHs	0,959	0,379	1,378	1,7	0,59	0,088	0,09	0,041

^aDp: Diámetro de Partícula Aerodinámico, ^bC.A.: Concentración Ambiental, < L.D.: bajo del limite de detección

analítico

Tabla III-16. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 12/06/03 al 19/06/03.

Dp ^a , um	0,1	0,18	0,32	0,56	1,0	1,8	3,2	18
Compuesto	C.A. ^b ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³	C.A. ng/m ³
NAP	< L.D.	< L.D.	0,003	0,01	0,004	0,005	0,02	0,004
ACE	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
ACN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FLN	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
PHE	0,02	0,006	0,021	0,019	< L.D.	0,001	< L.D.	< L.D.
ANT	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
FL	0,028	0,016	0,043	0,042	0,018	0,012	0,017	0,014
PY	0,031	0,013	0,052	0,05	0,015	0,008	0,016	< L.D.
BaA	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,107	0,028	0,013	0,02	0,011
CHR	0,052	0,019	0,127	0,124	0,031	< L.D.	0,021	< L.D.
BbF y BkF	0,256	0,073	0,458	0,363	0,074	0,003	0,007	0,004
BaP	0,155	0,058	0,272	0,195	0,041	< L.D.	< L.D.	< L.D.
INP	0,159	0,05	0,323	0,243	0,034	< L.D.	< L.D.	< L.D.
DBA	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
BghiP	0,206	0,061	0,317	0,19	0,041	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Σ PAHs	0,907	0,296	1,616	1,343	0,286	0,057	0,116	0,033

^aDp: Diámetro de Partícula Aerodinámico, ^bC.A.: Concentración Ambiental, < L.D.: bajo del limite de detección analítico

A continuación se muestran las figuras para los compuestos analizados en los distintos muestreos y para los que presentan un mayor potencial cancerígeno clasificada por la EPA, estos son benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno y dibenzo(a,h)antraceno, encontrándose este último bajo el limite de detección analítico para todos los casos.

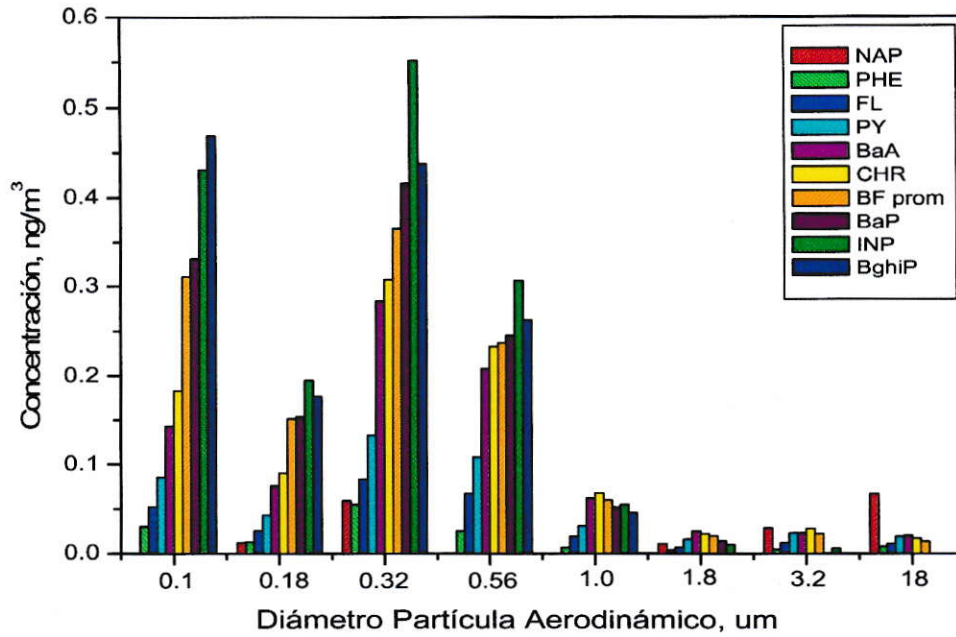


Figura III-18. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 15/05 al 22/05 del 2003.

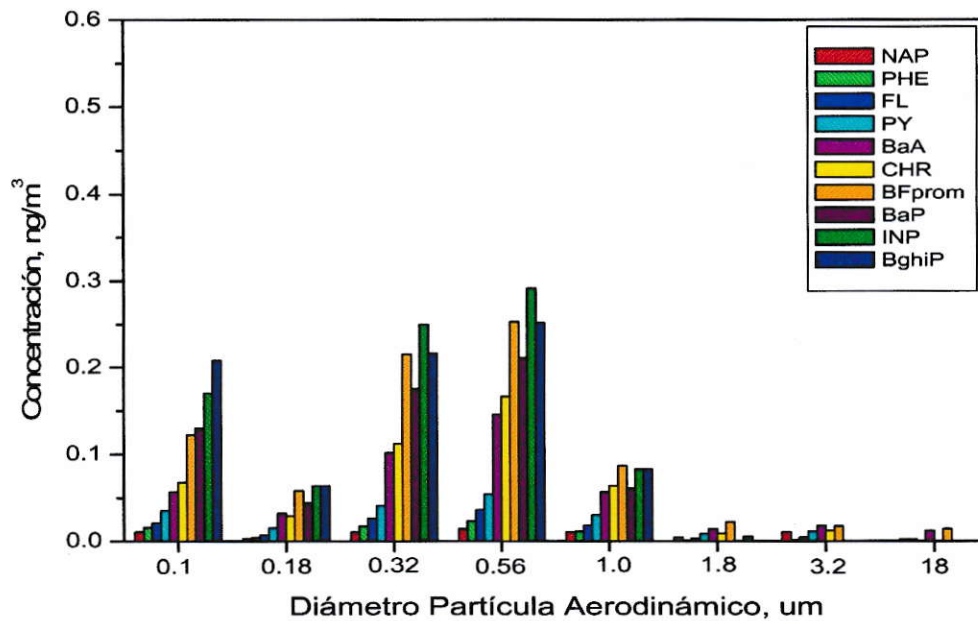


Figura III-19. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 29/05 al 05/06 del 2003.

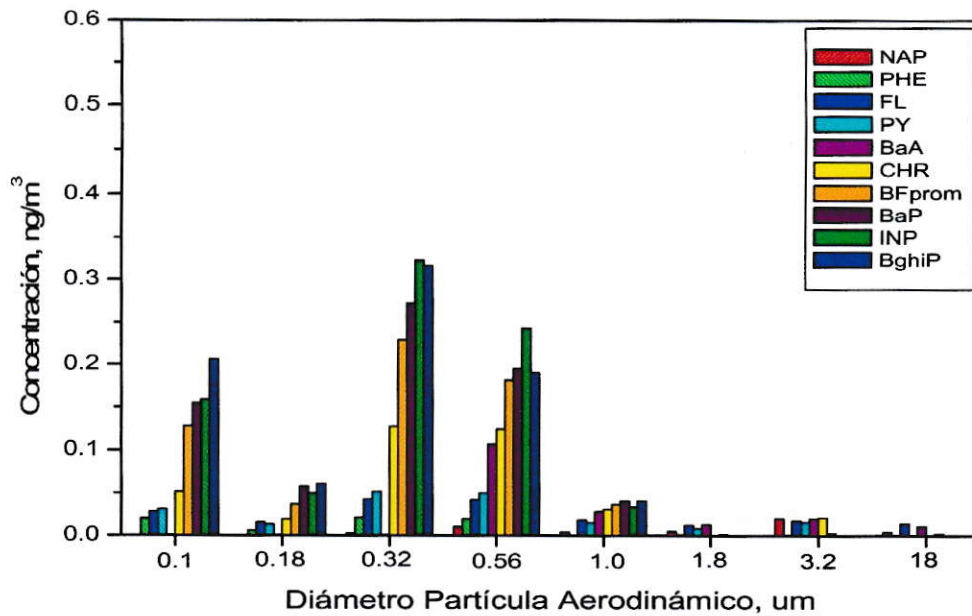


Figura III-20. Concentraciones ambientales de PAHs entre el 12/06 al 19/06 del 2003

En las figuras anteriores, III-18 a la III-20, se puede observar que la distribución de PAHs se encuentra mayoritariamente hacia las fracciones de diámetros más pequeños, menores a $1 \mu\text{m}$. En la Figura III-18 que representa el período con preemergencia ambiental, las concentraciones obtenidas de PAHs son casi el doble en magnitud que los obtenidos en un período normal, como se muestra en la Figura III-20.

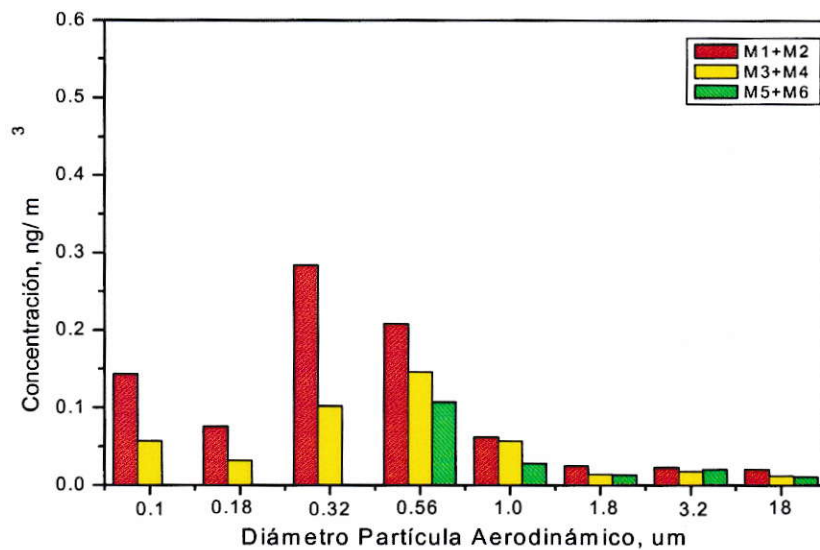


Figura III-21. Concentraciones de Benzo(a)antraceno vs Diámetro de Partícula.

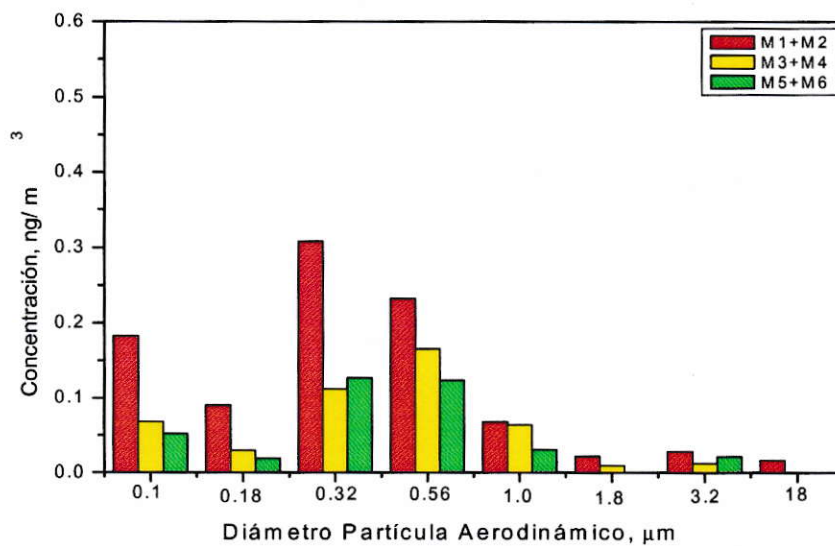


Figura III-22. Concentraciones de Criseno vs Diámetro de Partícula.

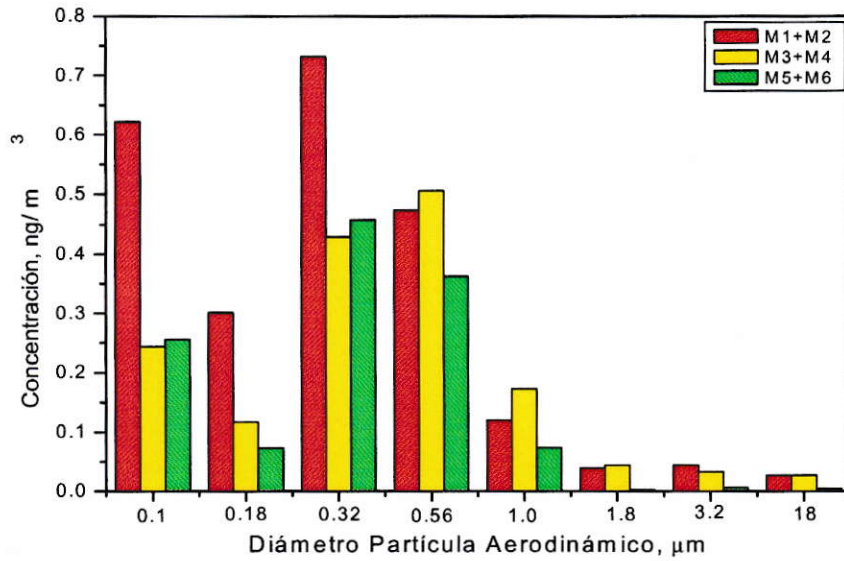


Figura III-23. Concentraciones de Benzo(b)fluoranteno y Benzo(k)fluoranteno vs Diámetro Partícula

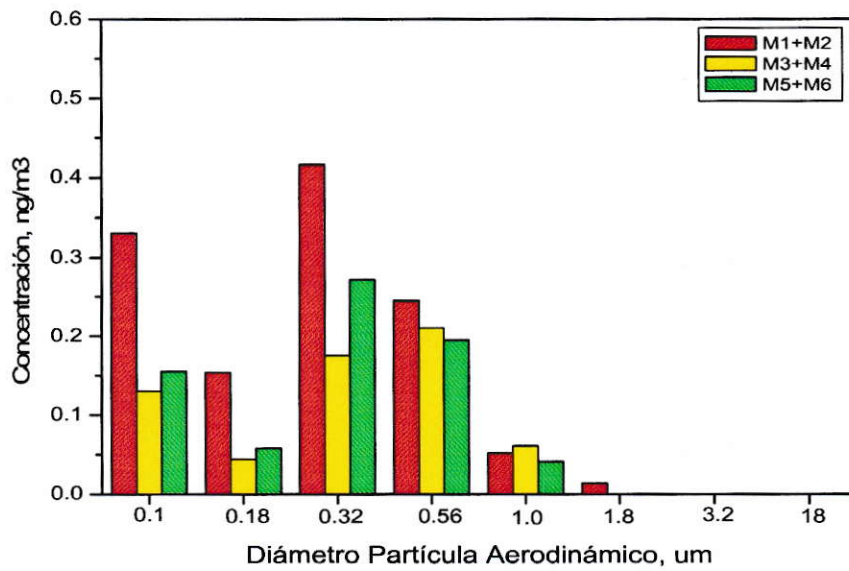


Figura III-24. Concentraciones de Benzo(a)pireno vs Diámetro Partícula.

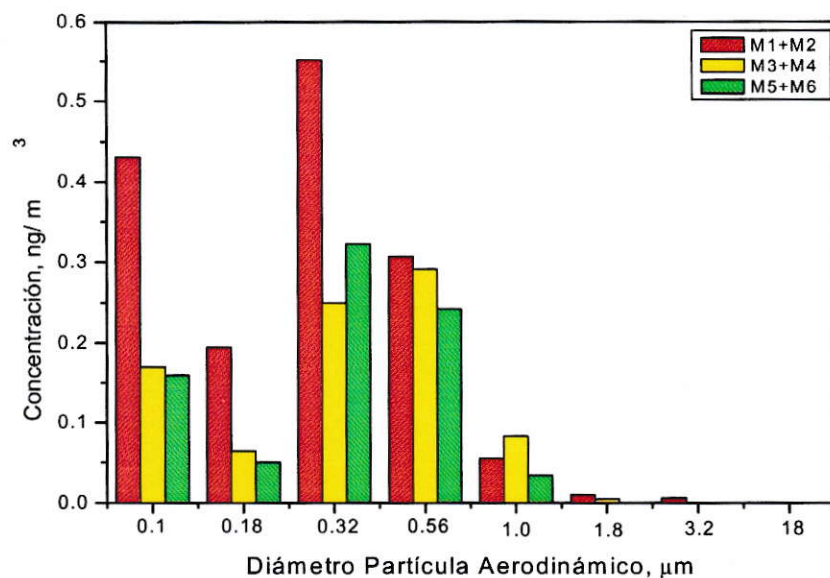


Figura III-25. Concentraciones de Indeno(1,2,3-cd)pireno vs Diámetro Partícula.

En las Figuras III-21 a la III-25 se presentaron las concentraciones obtenidas de aquellos PAHs con un mayor potencial cancerígeno en los episodios críticos de contaminación atmosférica, encontrándose las mayores concentraciones en los períodos de preemergencia ambiental.

CAPÍTULO IV DISCUSIÓN

Uno de los inconvenientes que se presenta al comenzar este estudio era que el MOUDI no había sido utilizado anteriormente en terreno y por períodos tan largos de tiempo como un equipo de muestreo rutinario ni validado, una forma de validarlo fue utilizar un equipo ya validado y que se ocupa en forma rutinaria como son los TEOM de la Red MACAM. Los equipos de muestreo de material particulado MOUDI y TEOM presentan distintos principios de operación. Con el MOUDI se logra la recolección de material particulado obteniendo un fraccionamiento de partículas. Para poder obtener la masa hay que retirar los filtros impactados del equipo, ambientarlos y luego pesar en forma manual. En cambio el TEOM colecta concentración de masa total de PM10 realizándose la pesada del filtro a 50°C en forma automática. Es por esto que sólo se puede esperar un comportamiento en masa similar como se muestra en la Figura III-1 y en la Figura III-2 (pag. 28) en la que se observa una buena correlación hasta valores de 200 ICAP, lo que validaría la metodología de muestreo utilizada con el MOUDI.

Es importante la realización del análisis gravimétrico y su fraccionamiento en los distintos tamaños de partículas ya que a través de el se puede apreciar la distribución de masa que presenta el material particulado, en especial el material particulado fino de diámetro menor a 1,0 μm donde se pudo observar la formación de aerosol secundario presente en la atmósfera, en especial aquel de diámetro 0,56 μm .

En la comuna de Pudahuel se produce un incremento en masa de las fracciones de las partículas de diámetro menor a 1,0 μm durante los episodios de preemergencia y alerta ambiental comparado con un episodio normal como se muestra en la Figura III-10

(pag.37). La especiación de material particulado fino nos evidencia que los episodios de contaminación atmosférica se producirían por la misma acción de las partículas finas presentes en la atmósfera.

En la Figura III-11 (pag.38) se puede observar como a la salida de un episodio de Alerta ambiental se produce la disminución de la concentración de las partículas finas debido a la mejoría de las condiciones meteorológicas como el aumento de la ventilación de la cuenca.

De la caracterización química inorgánica correspondientes a cationes se puede observar, en las Figuras III-15 a la III-17 (pag.45-46), que el ión amonio es el que se encuentra en mayor proporción hacia los diámetros menores a $1,0 \mu\text{m}$. La distribución del ión calcio se encuentra mayoritariamente hacia las partículas de mayor diámetro debido a que su principal fuente de origen es la composición propia del suelo, encontrando mayores concentraciones en los períodos con preemergencia y alerta ambiental. De los aniones se puede observar en las Figuras III-12 a la III-14 (pag. 41-42), que el cloruro es el que se encuentra en menor concentración debido a la composición propia de la atmósfera, donde este compuesto se presenta en muy bajas cantidades. El anión nitrato se encuentra en mayor concentración que el sulfato hacia los diámetros de partícula finas como en los períodos de episodios ambientales.

Las altas concentraciones de amonio y nitrato en las fracciones menores a $1,0 \mu\text{m}$ incrementan notoriamente en los períodos con preemergencia y alerta ambiental. Estos iones inorgánicos bajo condiciones meteorológicas apropiadas darían origen al material particulado fino del tipo aerosol secundario.

Los aerosoles secundarios se generan bajo condiciones meteorológicas apropiadas de humedad, temperatura y vientos. Como se observa en la Figura III-6 (pag.33) donde se presentan las condiciones meteorológicas de un período de preemergencia ambiental, se va produciendo un aumento en la humedad relativa y una disminución de temperatura ambiental, hasta llegar el día 18 de Mayo entre las 3 y 7 a.m. a una humedad relativa cercana al 80%, temperatura entre 4 a 5°C y una velocidad del viento entre 0,2 y 0,4 m/seg las que darían las condiciones óptimas para la generación de aerosol secundario.

Cabe destacar que una condición propia de la comuna de Pudahuel son sus variadas fuentes de amoniaco, provenientes de emisiones biogénicas a la atmósfera desde humedales de la zona como del entorno del río Mapocho.

De la caracterización orgánica los compuestos Acenaftileno, Acenafteno, Fluoranteno y Antraceno, formados con 3 y 4 anillos, que se encuentran bajo el límite de detección analítico, podrían estar sujetos a una mayor volatilización ya que presentan presiones de vapor altas, entre 10^{-1} y 10^{-3} Pa. Las mayores concentraciones de PAHs en el material particulado se encuentran hacia los diámetros de partículas menores a 1,0 μm .

Para los compuestos con potencial cancerígeno se observa en las Figuras III-21 a la III-25 (pag.53-55) una mayor concentración en los muestreos donde se produjeron los episodios ambientales de preemergencia y alerta, siendo el de mayor concentración el período con preemergencia ambiental, debido a que se produjo una mayor concentración de material particulado en la atmósfera, pudiendo éstos quedar adsorbidos en el aerosol. La literatura recomienda concentraciones ambientales límites para estos contaminantes.

En Suecia se recomienda para Benzo(a)pireno una concentración ambiental de 0,1 ng/m³, por lo que estaríamos por sobre los valores recomendados. Sin embargo, en Italia se recomienda un valor de 1,0 ng/m³ para este compuesto.

CAPÍTULO V CONCLUSIÓN

El método de fraccionamiento de partículas permitió determinar la concentración del material particulado fino en la comuna de Pudahuel. Los resultados indican un incremento de material particulado fino en períodos muy cortos de tiempo, bajo condiciones meteorológicas apropiadas. Además, las altas concentraciones de amonio y nitrato evidencian la formación de aerosoles secundarios inorgánicos en Pudahuel.

En los episodios de preemergencia y alerta ambiental incrementan las concentraciones de amonio y nitrato, lo que podría reafirmar la formación de aerosol secundario.

En la comuna de Pudahuel existen condiciones propias y favorables para la presencia de aerosol secundario, como son las fuentes biogénicas de amonio desde los humedales y desde el entorno del río Mapocho y la humedad presente en la zona.

Algunas recomendaciones principales para el control de las fuentes de amonio en Pudahuel serían:

- Realizar un monitoreo atmosférico de las emisiones gaseosas de amoníaco en torno al río Mapocho.
- Determinar las emisiones biogénicas de amoníaco a la atmósfera desde los humedales de la zona de Pudahuel.
- Realizar un monitoreo del material particulado fino, tanto en su distribución de tamaño como en el análisis químico de su composición.

Se sugiere extender este estudio durante el invierno del 2004 en la comuna de Pudahuel con las recomendaciones antes mencionadas, para así tener una visión más

acabada del origen de los contaminantes en esa zona, con el objeto de tomar medidas definitivas para el control de los aerosoles secundarios.

CAPÍTULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Boubel,R; Fox, D; Turner, B y Stern, A.1994. Fundamentals of air Pollution. 3° edición. pp 99-109.
- 2.- CONAMA. 1997. Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA).
- 3.- Jonas, P; Charlson R y Rodhe H. 1994. Climate Change. pp 130-157.
- 4.- Manahan, S. Environmental Chemistry. 6° Edición. pp 317-318, 686, 776.
- 5.- Sandoval, H; Préndez, M; Ulriksen,P. 1992. Contaminación Atmosférica de Santiago. Estado actual y soluciones.
- 6.- Sienna, R.2002. Tesis Dr. “Estudio de los compuestos aromáticos policíclicos presentes en la atmósfera de Santiago y sus posibles mecanismos de reacción”. Facultad de Ciencias Químicas y farmacéuticas. Universidad de Chile.
- 7.- USEPA. Air Quality criteria for Particulate Matter. Cap 4.pp 25-51.
- 8.- MSP Corporation. 1992. Manual de Instrucción Micro-Orifice Uniform Deposit Impacto (MOUDI), Model 100/Model 110.
- 9.- Marple, V. 1983. Microorifice Uniform deposit Impactor Operating Instructions. Appendix A. pp 28-31.
- 10.- Marple, V. 1987. Recent Developments in the Theory and design of inertial impactors. Annual Meeting of the American Association for Aerosol Research.
- 11.- Marple, V y Rubow K. 198-. Theory & Design Guidelines. Cap 4, pp 80-101.
- 12.- Hering, S y Marple, V.198-. Low-Pressure and Micro-Orifice Impactors. Cap 5, pp 103-127.
- 13.- Cifuentes, L; Vega, J y Kopfer, K. 2000. Effect of Fine Fraction of Particulate matter versus the Coarse Mass and Other Pollutants on daily Mortality in Santiago, Chile. Journal of the Air & Waste Management Association, 50: 1287-1298.
- 14.- Keywood, M; Ayers, G; Gillett, R y Cohen,D. 1999. Relationships between size segregated mass concentration data and ultrafine particle number concentrations in urban areas. Atmospheric Environment. 33: 2907-2913.

- 15.- McMurry, P. 2000. A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmospheric Environment*. 34:1959-1999.
- 16.- McMurry, P. 2000. *Atmospheric Aerosols and Visibility Impairment*.
- 17.- McMurry, V; Fang, C.P; Marple V y Rubou K.L. 1990. Effect of flow-induced relative humidity changes on size cuts for H₂SO₄ droplets in the Micro Orifice uniform deposit Impactor (MOUDI). *Aerosol Science and Technology*, Vol 706.
- 18.- SESMA. 2002. Episodios críticos de contaminación: Medidas y propuestas planteadas en la comunidad internacional.
- 19.- Shen, S; Jaques, P; Zhu, Y y Geller M. 2002. Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM 2.5, PM10 and coarse (PM 2.5-10) concentrations. *Atmospheric Environment*. 36: 3939-3950.
- 20.- Sokhi, R y Luhana, L. 2001. Interpretation of the results of the chemical characterisation of size fractionated particulate matter collected at a semi rural site in the UK. <http://aix.meng.ath.gr/saturn/annualrep01/AR01-sokhi.PDF>
- 21.- Tanner, R y Parkhurst, W. 2000. Chemical Composition of Fine Particles in the Tennessee Valley Region. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50: 1299-1307.
- 22.- Allen, J; Dookeran, N; Smith K y Saforim, A. 1996. Measurement of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Associated with Size-Segregated Atmospheric Aerosols in Massachusetts. *Environmental Science & Technology*, 30: 1023-1031.
- 23.- Didyk, B; Simoneit, B; Pezoa, A; Riveros, L y Flores, A. 2000. Urban aerosol particles of Santiago, Chile: organic content and molecular characterization. *Atmospheric Environment*. 34: 1167-1179.
- 24.- Kulkarni, P. y Venkataraman, C. 2000. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Mumbai, India. *Atmospheric Environment*. 34: 2785-2790.
- 25.- Cordero, R. 2001. Un análisis no causal del origen de la contaminación atmosférica en la comuna de Pudahuel, Santiago de Chile. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- 26.- Pizarro, R. y Vasconi, P. Publicaciones Terram. 2001. Contaminación Atmosférica de la Región Metropolitana. Análisis de Políticas Públicas N°3.
- 27.- Finlayson-Pitts, B y Pitts Jr, J. 1997. Tropospheric Air Pollution: Ozone, Airborne Toxics, PAHs, and Particles. *Science*. 276: 1045-1051.

- 28.- Perng-Jy, Hong-Yong, Wem-Jhy. 2001. Characteristics of Exposure Profiles for workers Exposed to Airborne Dusts and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Carbon Black manufacturing Industry. *Journal of Occupational Health*. 43:118-128.
- 29.- Chow, J. 1995. Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air quality Standars for Suspended Particles. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 45: 320-382.
- 30.- Finlayson-Pitts, B.y Pitts, Jr J. 1986. Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. Cap 12, pag 830, Cap 13, pag 870-943
- 31.- Seinfeld, J.y Pandis, S. 1998. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. Pag 441
- 32.- Jacob, D. 2000. Heterogeneous Chemistry and tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*. 34:2131-2159.
- 33.- Muraleedharan, T. R.; radojevic, M.; Waugh, A.; Carvano, A. 2000. Chemical characterisation of the haze in Brunei Darussalam during the 1998 episode. *Atmospheric Environment*. 34:2725-2731.
- 34.- Hailwood, M. 2001. Ambient Air Pollution By Polycyclic Aromatic Hidrocarbons (PAHs).
- 35.-Servio de Salud Metropolitano del Ambiente. www.sesma.cl
- 36.- Internacional Agency for Research on Cancer. www.iarc.fr
- 37.- Artaxo, P.; castanho, A.; Aldape. F.; Pla, R.; Cortes. E.; Oyola, P. 2001. Urbana ir pollution in Latin American Cities: Results from a joint study in Sao Paulo, santiago de Chile, Mexico City and Córdoba.
<http://ies.jrc.cec.eu.int/Units/cc/events/torino2001/torinocd/Documents/Urban/UP21.htm>
- 38.- MSP Corporation. www.msppcorp.com

ANEXO A ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE REFERIDO A PARTÍCULAS (ICAP)

Tabla A-1. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 15/05/03 al 19/05/03. Fuente: SESMA.

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
15/05/03	18	102	Regular	17/05/03	2	82	Bueno	18/05/03	10	233	Malo
15/05/03	19	100	Bueno	17/05/03	3	81	Bueno	18/05/03	11	231	Malo
15/05/03	20	99	Bueno	17/05/03	4	80	Bueno	18/05/03	12	236	Malo
15/05/03	21	95	Bueno	17/05/03	5	80	Bueno	18/05/03	13	240	Malo
15/05/03	22	91	Bueno	17/05/03	6	79	Bueno	18/05/03	14	242	Malo
15/05/03	23	87	Bueno	17/05/03	7	80	Bueno	18/05/03	15	247	Malo
15/05/03	24	84	Bueno	17/05/03	8	77	Bueno	18/05/03	16	256	Malo
16/05/03	1	82	Bueno	17/05/03	9	75	Bueno	18/05/03	17	264	Malo
16/05/03	2	81	Bueno	17/05/03	10	73	Bueno	18/05/03	18	282	Malo
16/05/03	3	81	Bueno	17/05/03	11	73	Bueno	18/05/03	19	298	Malo
16/05/03	4	79	Bueno	17/05/03	12	73	Bueno	18/05/03	20	298	Malo
16/05/03	5	79	Bueno	17/05/03	13	74	Bueno	18/05/03	21	291	Malo
16/05/03	6	78	Bueno	17/05/03	14	75	Bueno	18/05/03	22	284	Malo
16/05/03	7	77	Bueno	17/05/03	15	76	Bueno	18/05/03	23	280	Malo
16/05/03	8	80	Bueno	17/05/03	16	76	Bueno	18/05/03	24	273	Malo
16/05/03	9	84	Bueno	17/05/03	17	77	Bueno	19/05/03	1	260	Malo
16/05/03	10	84	Bueno	17/05/03	18	78	Bueno	19/05/03	2	247	Malo
16/05/03	11	84	Bueno	17/05/03	19	79	Bueno	19/05/03	3	240	Malo
16/05/03	12	84	Bueno	17/05/03	20	84	Bueno	19/05/03	4	236	Malo
16/05/03	13	83	Bueno	17/05/03	21	91	Bueno	19/05/03	5	229	Malo
16/05/03	14	83	Bueno	17/05/03	22	99	Bueno	19/05/03	6	229	Malo
16/05/03	15	83	Bueno	17/05/03	23	120	Regular	19/05/03	7	233	Malo
16/05/03	16	84	Bueno	17/05/03	24	140	Regular	19/05/03	8	247	Malo
16/05/03	17	83	Bueno	18/05/03	1	158	Regular	19/05/03	9	244	Malo
16/05/03	18	82	Bueno	18/05/03	2	184	Regular	19/05/03	10	249	Malo
16/05/03	19	81	Bueno	18/05/03	3	209	Malo	19/05/03	11	267	Malo
16/05/03	20	80	Bueno	18/05/03	4	222	Malo	19/05/03	12	269	Malo
16/05/03	21	80	Bueno	18/05/03	5	233	Malo	19/05/03	13	269	Malo
16/05/03	22	79	Bueno	18/05/03	6	238	Malo	19/05/03	14	267	Malo
16/05/03	23	80	Bueno	18/05/03	7	236	Malo	19/05/03	15	269	Malo
16/05/03	24	81	Bueno	18/05/03	8	233	Malo	19/05/03	16	276	Malo
17/05/03	1	83	Bueno	18/05/03	9	229	Malo			ICAP X	153.08

Tabla A-2. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 19/05/03 al 22/05/03. Fuente: SESMA.

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
19/05/03	17	273	Malo	20/05/03	18	111	Regular	21/05/03	19	5	Bueno
19/05/03	18	264	Malo	20/05/03	19	99	Bueno	21/05/03	20	5	Bueno
19/05/03	19	244	Malo	20/05/03	20	96	Bueno	21/05/03	21	5	Bueno
19/05/03	20	236	Malo	20/05/03	21	90	Bueno	21/05/03	22	5	Bueno
19/05/03	21	231	Malo	20/05/03	22	84	Bueno	21/05/03	23	5	Bueno
19/05/03	22	222	Malo	20/05/03	23	77	Bueno	21/05/03	24	6	Bueno
19/05/03	23	216	Malo	20/05/03	24	71	Bueno	22/05/03	1	6	Bueno
19/05/03	24	213	Malo	21/05/03	1	65	Bueno	22/05/03	2	6	Bueno
20/05/03	1	213	Malo	21/05/03	2	59	Bueno	22/05/03	3	6	Bueno
20/05/03	2	211	Malo	21/05/03	3	54	Bueno	22/05/03	4	6	Bueno
20/05/03	3	207	Malo	21/05/03	4	49	Bueno	22/05/03	5	6	Bueno
20/05/03	4	204	Malo	21/05/03	5	43	Bueno	22/05/03	6	6	Bueno
20/05/03	5	211	Malo	21/05/03	6	38	Bueno	22/05/03	7	7	Bueno
20/05/03	6	211	Malo	21/05/03	7	34	Bueno	22/05/03	8	7	Bueno
20/05/03	7	209	Malo	21/05/03	8	30	Bueno	22/05/03	9	9	Bueno
20/05/03	8	200	Regular	21/05/03	9	27	Bueno	22/05/03	10	9	Bueno
20/05/03	9	193	Regular	21/05/03	10	25	Bueno	22/05/03	11	11	Bueno
20/05/03	10	182	Regular	21/05/03	11	22	Bueno	22/05/03	12	11	Bueno
20/05/03	11	160	Regular	21/05/03	12	20	Bueno	22/05/03	13	13	Bueno
20/05/03	12	153	Regular	21/05/03	13	17	Bueno	22/05/03	14	13	Bueno
20/05/03	13	151	Regular	21/05/03	14	13	Bueno	22/05/03	15	13	Bueno
20/05/03	14	156	Regular	21/05/03	15	9	Bueno	22/05/03	16	13	Bueno
20/05/03	15	151	Regular	21/05/03	16	8	Bueno				
20/05/03	16	136	Regular	21/05/03	17	6	Bueno		ICAP	X	84.486
20/05/03	17	127	Regular	21/05/03	18	5	Bueno				

Tabla A-3. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 29/05/03 al 02/06/03. Fuente: SESMA.

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
29/05/03	11	84	Bueno	30/05/03	22	55	Bueno	01/06/03	9	269	Malo
29/05/03	12	84	Bueno	30/05/03	23	57	Bueno	01/06/03	10	269	Malo
29/05/03	13	87	Bueno	30/05/03	24	61	Bueno	01/06/03	11	256	Malo
29/05/03	14	89	Bueno	31/05/03	1	63	Bueno	01/06/03	12	251	Malo
29/05/03	15	93	Bueno	31/05/03	2	66	Bueno	01/06/03	13	244	Malo
29/05/03	16	93	Bueno	31/05/03	3	68	Bueno	01/06/03	14	244	Malo
29/05/03	17	93	Bueno	31/05/03	4	69	Bueno	01/06/03	15	242	Malo
29/05/03	18	91	Bueno	31/05/03	5	70	Bueno	01/06/03	16	249	Malo
29/05/03	19	89	Bueno	31/05/03	6	70	Bueno	01/06/03	17	247	Malo
29/05/03	20	97	Bueno	31/05/03	7	71	Bueno	01/06/03	18	233	Malo
29/05/03	21	83	Bueno	31/05/03	8	71	Bueno	01/06/03	19	213	Malo
29/05/03	22	81	Bueno	31/05/03	9	71	Bueno	01/06/03	20	191	Regular
29/05/03	23	79	Bueno	31/05/03	10	71	Bueno	01/06/03	21	167	Regular
29/05/03	24	79	Bueno	31/05/03	11	77	Bueno	01/06/03	22	138	Regular
30/05/03	1	77	Bueno	31/05/03	12	77	Bueno	01/06/03	23	107	Regular
30/05/03	2	76	Bueno	31/05/03	13	79	Bueno	01/06/03	24	95	Regular
30/05/03	3	75	Bueno	31/05/03	14	79	Bueno	02/06/03	1	85	Bueno
30/05/03	4	73	Bueno	31/05/03	15	77	Bueno	02/06/03	2	75	Bueno
30/05/03	5	71	Bueno	31/05/03	16	75	Bueno	02/06/03	3	71	Bueno
30/05/03	6	69	Bueno	31/05/03	17	75	Bueno	02/06/03	4	67	Bueno
30/05/03	7	67	Bueno	31/05/03	18	79	Bueno	02/06/03	5	63	Bueno
30/05/03	8	65	Bueno	31/05/03	19	84	Bueno	02/06/03	6	59	Bueno
30/05/03	9	60	Bueno	31/05/03	20	92	Bueno	02/06/03	7	55	Bueno
30/05/03	10	57	Bueno	31/05/03	21	100	Bueno	02/06/03	8	51	Bueno
30/05/03	11	55	Bueno	31/05/03	22	124	Regular	02/06/03	9	48	Bueno
30/05/03	12	54	Bueno	31/05/03	23	144	Regular	02/06/03	10	45	Bueno
30/05/03	13	52	Bueno	31/05/03	24	153	Regular	02/06/03	11	46	Bueno
30/05/03	14	51	Bueno	01/06/03	1	176	Regular	02/06/03	12	46	Bueno
30/05/03	15	51	Bueno	01/06/03	2	196	Regular				
30/05/03	16	51	Bueno	01/06/03	3	200	Regular		ICAP X		107.18
30/05/03	17	50	Bueno	01/06/03	4	209	Malo				
30/05/03	18	49	Bueno	01/06/03	5	220	Malo				
30/05/03	19	49	Bueno	01/06/03	6	231	Malo				
30/05/03	20	50	Bueno	01/06/03	7	242	Malo				
30/05/03	21	52	Bueno	01/06/03	8	260	Malo				

Tabla A-4. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 02/06/03 al 05/06/03. Fuente: SESMA

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
02/06/03	13	45	Bueno	03/06/03	15	77	Bueno	04/06/03	17	83	Bueno
02/06/03	14	43	Bueno	03/06/03	16	78	Bueno	04/06/03	18	83	Bueno
02/06/03	15	43	Bueno	03/06/03	17	75	Bueno	04/06/03	19	81	Bueno
02/06/03	16	42	Bueno	03/06/03	18	75	Bueno	04/06/03	20	79	Bueno
02/06/03	17	44	Bueno	03/06/03	19	77	Bueno	04/06/03	21	76	Bueno
02/06/03	18	45	Bueno	03/06/03	20	75	Bueno	04/06/03	22	72	Bueno
02/06/03	19	46	Bueno	03/06/03	21	73	Bueno	04/06/03	23	69	Bueno
02/06/03	20	47	Bueno	03/06/03	22	72	Bueno	04/06/03	24	95	Bueno
02/06/03	21	49	Bueno	03/06/03	23	71	Bueno	05/06/03	1	63	Bueno
02/06/03	22	53	Bueno	03/06/03	24	73	Bueno	05/06/03	2	60	Bueno
02/06/03	23	58	Bueno	04/06/03	1	73	Bueno	05/06/03	3	58	Bueno
02/06/03	24	60	Bueno	04/06/03	2	75	Bueno	05/06/03	4	56	Bueno
03/06/03	1	63	Bueno	04/06/03	3	75	Bueno	05/06/03	5	55	Bueno
03/06/03	2	65	Bueno	04/06/03	4	76	Bueno	05/06/03	6	55	Bueno
03/06/03	3	67	Bueno	04/06/03	5	77	Bueno	05/06/03	7	53	Bueno
03/06/03	4	69	Bueno	04/06/03	6	76	Bueno	05/06/03	8	51	Bueno
03/06/03	5	71	Bueno	04/06/03	7	74	Bueno	05/06/03	9	49	Bueno
03/06/03	6	73	Bueno	04/06/03	8	74	Bueno	05/06/03	10	48	Bueno
03/06/03	7	75	Bueno	04/06/03	9	75	Bueno	05/06/03	11	47	Bueno
03/06/03	8	77	Bueno	04/06/03	10	73	Bueno	05/06/03	12	47	Bueno
03/06/03	9	77	Bueno	04/06/03	11	73	Bueno	05/06/03	13	45	Bueno
03/06/03	10	79	Bueno	04/06/03	12	75	Bueno	05/06/03	14	42	Bueno
03/06/03	11	82	Bueno	04/06/03	13	77	Bueno	05/06/03	15	41	Bueno
03/06/03	12	81	Bueno	04/06/03	14	79	Bueno	05/06/03	16	39	Bueno
03/06/03	13	81	Bueno	04/06/03	15	81	Bueno				
03/06/03	14	79	Bueno	04/06/03	16	82	Bueno			ICAP X	66.08

Tabla A-5. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 12/06/03 al 16/06/03. Fuente: SESMA.

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
12/06/03	16	41	Bueno	13/06/03	24	49	Bueno	15/06/03	8	25	Bueno
12/06/03	17	43	Bueno	14/06/03	1	50	Bueno	15/06/03	9	23	Bueno
12/06/03	18	43	Bueno	14/06/03	2	50	Bueno	15/06/03	10	21	Bueno
12/06/03	19	45	Bueno	14/06/03	3	49	Bueno	15/06/03	11	17	Bueno
12/06/03	20	46	Bueno	14/06/03	4	47	Bueno	15/06/03	12	15	Bueno
12/06/03	21	46	Bueno	14/06/03	5	47	Bueno	15/06/03	13	15	Bueno
12/06/03	22	46	Bueno	14/06/03	6	46	Bueno	15/06/03	14	14	Bueno
12/06/03	23	46	Bueno	14/06/03	7	44	Bueno	15/06/03	15	13	Bueno
12/06/03	24	48	Bueno	14/06/03	8	42	Bueno	15/06/03	16	11	Bueno
13/06/03	1	49	Bueno	14/06/03	9	41	Bueno	15/06/03	17	11	Bueno
13/06/03	2	49	Bueno	14/06/03	10	42	Bueno	15/06/03	18	11	Bueno
13/06/03	3	51	Bueno	14/06/03	11	43	Bueno	15/06/03	19	12	Bueno
13/06/03	4	51	Bueno	14/06/03	12	44	Bueno	15/06/03	20	15	Bueno
13/06/03	5	53	Bueno	14/06/03	13	43	Bueno	15/06/03	21	18	Bueno
13/06/03	6	53	Bueno	14/06/03	14	43	Bueno	15/06/03	22	21	Bueno
13/06/03	7	55	Bueno	14/06/03	15	42	Bueno	15/06/03	23	26	Bueno
13/06/03	8	55	Bueno	14/06/03	16	42	Bueno	15/06/03	24	31	Bueno
13/06/03	9	56	Bueno	14/06/03	17	42	Bueno	16/06/03	1	33	Bueno
13/06/03	10	54	Bueno	14/06/03	18	40	Bueno	16/06/03	2	35	Bueno
13/06/03	11	53	Bueno	14/06/03	19	39	Bueno	16/06/03	3	37	Bueno
13/06/03	12	53	Bueno	14/06/03	20	37	Bueno	16/06/03	4	39	Bueno
13/06/03	13	54	Bueno	14/06/03	21	35	Bueno	16/06/03	5	39	Bueno
13/06/03	14	54	Bueno	14/06/03	22	35	Bueno	16/06/03	6	41	Bueno
13/06/03	15	54	Bueno	14/06/03	23	33	Bueno	16/06/03	7	41	Bueno
13/06/03	16	55	Bueno	14/06/03	24	31	Bueno	16/06/03	8	42	Bueno
13/06/03	17	54	Bueno	15/06/03	1	29	Bueno	16/06/03	9	44	Bueno
13/06/03	18	55	Bueno	15/06/03	2	27	Bueno	16/06/03	10	45	Bueno
13/06/03	19	54	Bueno	15/06/03	3	27	Bueno	16/06/03	11	45	Bueno
13/06/03	20	53	Bueno	15/06/03	4	27	Bueno	16/06/03	12	45	Bueno
13/06/03	21	53	Bueno	15/06/03	5	27	Bueno				
13/06/03	22	51	Bueno	15/06/03	6	26	Bueno		ICAP	X	39.28
13/06/03	23	51	Bueno	15/06/03	7	25	Bueno				

Tabla A-6. Valores de Índice de Calidad de Aire referido a Partículas del 16/06/03 al

19/06/03. Fuente: SESMA.

Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad	Fecha	Hora	ICAP	Calidad
16/06/03	13	46	Bueno	17/06/03	15	69	Bueno	18/06/03	17	80	Bueno
16/06/03	14	47	Bueno	17/06/03	16	71	Bueno	18/06/03	18	80	Bueno
16/06/03	15	47	Bueno	17/06/03	17	73	Bueno	18/06/03	19	82	Bueno
16/06/03	16	47	Bueno	17/06/03	18	71	Bueno	18/06/03	20	85	Bueno
16/06/03	17	48	Bueno	17/06/03	19	69	Bueno	18/06/03	21	86	Bueno
16/06/03	18	51	Bueno	17/06/03	20	69	Bueno	18/06/03	22	92	Bueno
16/06/03	19	55	Bueno	17/06/03	21	71	Bueno	18/06/03	23	95	Bueno
16/06/03	20	57	Bueno	17/06/03	22	73	Bueno	18/06/03	24	96	Bueno
16/06/03	21	58	Bueno	17/06/03	23	73	Bueno	19/06/03	1	97	Bueno
16/06/03	22	56	Bueno	17/06/03	24	72	Bueno	19/06/03	2	97	Bueno
16/06/03	23	55	Bueno	18/06/03	1	72	Bueno	19/06/03	3	96	Bueno
16/06/03	24	54	Bueno	18/06/03	2	73	Bueno	19/06/03	4	97	Bueno
17/06/03	1	57	Bueno	18/06/03	3	73	Bueno	19/06/03	5	97	Bueno
17/06/03	2	58	Bueno	18/06/03	4	72	Bueno	19/06/03	6	95	Bueno
17/06/03	3	59	Bueno	18/06/03	5	72	Bueno	19/06/03	7	97	Bueno
17/06/03	4	61	Bueno	18/06/03	6	74	Bueno	19/06/03	8	99	Bueno
17/06/03	5	63	Bueno	18/06/03	7	75	Bueno	19/06/03	9	102	Regular
17/06/03	6	63	Bueno	18/06/03	8	75	Bueno	19/06/03	10	104	Regular
17/06/03	7	62	Bueno	18/06/03	9	76	Bueno	19/06/03	11	104	Regular
17/06/03	8	63	Bueno	18/06/03	10	77	Bueno	19/06/03	12	100	Bueno
17/06/03	9	63	Bueno	18/06/03	11	77	Bueno	19/06/03	13	99	Bueno
17/06/03	10	63	Bueno	18/06/03	12	77	Bueno	19/06/03	14	97	Bueno
17/06/03	11	64	Bueno	18/06/03	13	79	Bueno	19/06/03	15	95	Bueno
17/06/03	12	66	Bueno	18/06/03	14	80	Bueno				
17/06/03	13	67	Bueno	18/06/03	15	81	Bueno		ICAP	X	74.59
17/06/03	14	68	Bueno	18/06/03	16	80	Bueno				