

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.®

“ESTUDIO DE LAS PARTICULAS  $PM_{10}$  Y  $PM_{2.5}$   
EN 2 ZONAS DEL AREA METROPOLITANA DE  
MONTERREY DURANTE 3 EPOCAS DEL AÑO”

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRIA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

POR:

LEONARDO ALBERTO SANCHEZ MARTINEZ

MONTERREY, N. L.

MAYO DE 2006

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**“ESTUDIO DE LAS PARTICULAS  $PM_{2.5}$  Y  $PM_{10}$   
EN 2 ZONAS DEL AREA METROPOLITANA DE  
MONTERREY DURANTE 3 EPOCAS DEL AÑO”**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**POR:**

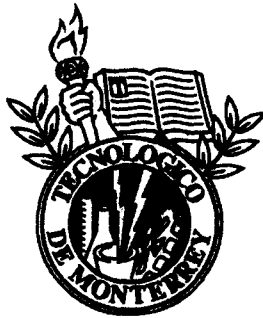
**LEONARDO ALBERTO SANCHEZ MARTINEZ**

**MONTERREY, N. L.**

**MAYO DE 2006**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.®**

**“ESTUDIO DE LAS PARTÍCULAS  $PM_{2.5}$  Y  $PM_{10}$  EN 2 ZONAS DEL ÁREA  
METROPOLITANA DE MONTERREY DURANTE 3 ÉPOCAS DEL AÑO.”**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE**

**MAESTRIA EN CIENCIAS**

**CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**POR**

**LEONARDO ALBERTO SÁNCHEZ MARTÍNEZ**

**MONTERREY, N. L.**

**MAYO, 2006.**

## DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza para concluir esta etapa de mi vida y las ilusiones con que comienzo cada nuevo desafío.

Con mucho cariño para mi mamá Berna Martínez, mi tía Rosa Martínez y mi abuelo Leonardo Martínez quienes siempre me han apoyado en todo lo que decido sin importarles nada más que mi felicidad y porque siguen creyendo en mí. Siempre serán el impulso que me anime a perderme en cada uno de los laberintos que trae esta vida.

A Lupita Amador, quien un día apareció en mi vida y me apartó del camino de la soledad para llevarme, tomándome de la mano, a vivir la aventura del amor... no puedo imaginar un mundo sin tí.

A mis hermanos Quique y Marcos, quienes a pesar de la distancia siempre interrumpen mis pensamientos dibujando una sonrisa con algún recuerdo de tantos y tan gratos que guardamos.

A mi gran familia: Raúl Bautista, mis tíos y mis primos. Por ese pequeño instante que se toman en sus vidas para pensar en mí. Se les quiere.

A mi hijita Andrea. Por tí pretendo lo inalcanzable y por tí soy más fuerte que el destino. Te amo chiquita.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Gerardo Manuel Mejía Velázquez por su apoyo y experiencia en la realización de este trabajo. Y sobre todo, por brindarme su amistad y dejarme compartir momentos con su agradable familia.

A la Dra. Ruth Reyna y al Dr. Porfirio Caballero por sus valiosas recomendaciones para la mejora de este trabajo.

A mis profesores del Tec de Monterrey. Toda mi admiración y respeto para ustedes, fue un privilegio asistir a sus cátedras.

A mis queridos amigos del Laboratorio de Modelación Ambiental: Gracias a Luisa y sus breves instantes con café y tabaco, a Jorge y a Max por aportar su tiempo y energía al trabajo de campo. A Marco por su bondad, su compañerismo, su comprensión y por lo que me permitió aprender de él; a Aida, nadie sabe usar las palabras como tú. Gracias Alex, por tu confianza y porque el tiempo que compartimos en cada asignatura también consolidó más nuestra amistad.

A mis amigos de la maestría, muy en especial a Luis Pablo, Alfonso y Gustavo, por aquellas dificultades que nada tienen que ver con balances de materia y energía. Es la confianza lo que hace la diferencia en nuestra amistad.

No puedo olvidar a mis queridas biotecnólogas. Gracias Esther, por ser siempre amable y dispuesta; a Diana por soportarme y por la confianza que me inspiras. Gracias Irasema por dejarme verte siempre alegre y por la manera en que tomas todas las bromas que te gasto y a tí Mónica, porque en el poco tiempo compartido pudimos forjar una nueva amistad. Hasta siempre niñas.

## RESUMEN

Las partículas suspendidas en el aire representan un riesgo grave para la salud al llegar a depositarse en los pulmones. Además, incrementan las reacciones químicas en la atmósfera; reducen la visibilidad; aumentan la posibilidad de la precipitación, la niebla y las nubes; reducen la radiación solar produciendo cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas; ensucian los materiales y degradan el suelo. La magnitud del impacto en cada una de las áreas anteriores es función del intervalo del tamaño de las partículas presentes en la atmósfera local, la concentración de las partículas y las composiciones química y física de las mismas. La exposición humana a la materia particulada (PM) se ha asociado con los índices de mortalidad y mala sanidad en grandes ciudades, como la Ciudad de México. La reducción de estos contaminantes en el aire representaría una disminución en los problemas mencionados y de los costos asociados a estos impactos.

El continuo desarrollo urbano e industrial de Monterrey ha deteriorado y alterado la calidad del aire. Las concentraciones de partículas presentes en este medio son muy superiores a los límites máximos permitidos por las normas vigentes de calidad del aire. Existe evidencia de que la atmósfera de Monterrey posee una alta concentración de partículas menores a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). Desde 1993 se han reportado concentraciones de  $\text{PM}_{10}$ , que incluyen partículas finas menores a  $2.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) consideradas de mayor riesgo a la salud al depositarse en los pulmones. La acumulación de estas origina enfermedades como la silicosis y la asbestosis, además de irritación en vías respiratorias. Estas partículas se comenzaron a monitorear desde 2003 en el área metropolitana de Monterrey, hasta Agosto del año 2005 se registraron 68 violaciones a la norma de  $\text{PM}_{10}$ .

Debido al panorama anterior, la caracterización de partículas  $\text{PM}_{2.5}$  en el área metropolitana de Monterrey es una oportunidad de investigación importante para proponer estrategias costeables y efectivas par el control de las  $\text{PM}_{2.5}$  buscando reducir los efectos que estas tienen en la salud.

En este trabajo se obtuvieron datos de concentración y distribución de tamaño de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  con los cuales fue posible obtener los volúmenes de estas y encontrar los perfiles acumulados de concentración y volumen. Estos datos sirvieron para realizar análisis estadísticos que permitieron demostrar la independencia entre las muestras de datos obtenidas, excepto en un par de casos que se analizan en el reporte. A la par de lo anterior se obtuvieron filtros con muestras que se analizaron para determinar los hidrocarburos poliaromáticos presentes en las muestras, los cuales se reportan en el capítulo de análisis de resultados.

Los resultados de la caracterización física muestran que las concentraciones y los volúmenes de los diferentes intervalos de partículas son similares en invierno y verano para el sitio de monitoreo localizado en el sur del Área Metropolitana de Monterrey y para el de Santa Catarina, en donde las partículas incluidas en los intervalos de tamaño más grande representan la mayor cantidad de la fracción del volumen aunque en cantidad sean las que menos presencia tienen en la muestra. Al contrario de lo anterior, el análisis estadístico mostró que es necesario planear campañas en diferentes zonas del área metropolitana de Monterrey y en diferentes épocas del año ya que la caracterización llevada a cabo en una zona no es representativa de toda la ciudad y la distribución de volumen de cada intervalo de partículas también varía según la época del año aún en el mismo sitio de monitoreo. Por último, del análisis químico de las muestras se identificaron 16 hidrocarburos pero las cantidades de los mismos en las muestras se encuentran en cantidades muy bajas por lo que se recomienda aplicar otro método de análisis a las muestras que puedan obtenerse de futuros monitoreos o utilizar equipos que permitan tener un mayor volumen de muestreo y que faciliten la identificación de las especies componentes de la mezcla.

## INDICE

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Índice .....	v
Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tablas .....	xii
Nomenclatura.....	xv
1 CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.1.1 La contaminación atmosférica en Monterrey. ....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Alcance .....	4
2 GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y PARTÍCULAS .....	6
2.1 Antecedentes sobre la contaminación del aire.....	6
2.2 Clasificación de los contaminantes.....	7
2.3 Efectos de las partículas atmosféricas.....	8
2.4 La investigación sobre materia particulada en México.....	11
2.5 Panorama mundial de la materia particulada en la atmósfera.....	12
3 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	17
3.1 Descripción general. ....	17
3.2 Descripción técnica de los equipos usados en la investigación.....	18
3.2.1 Equipo para la medición de concentración de las partículas	



	PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	18
	3.2.2 Equipo para muestreo secuencial de los contaminantes del aire.....	20
	3.2.3 Contador de partículas.....	21
3.3	Técnicas de proceso para los datos.....	22
	3.3.1 Cálculo del volumen y concentración para cada intervalo de partícula.....	23
	3.3.2 Variaciones estacionales y espaciales de la fracción de volumen de PM <sub>10</sub> .....	24
3.4	Determinación de hidrocarburos poliaromáticos (HPA) por técnica de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).....	27
3.5	Análisis toxicológico de las PM <sub>10</sub> del AMM.....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE PARTICULAS.</b>	<b>29</b>
4.1	Sitios y períodos de monitoreo.....	29
4.2	Datos de concentración de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> reportados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA).....	32
4.3	Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en el periodo de invierno del 2004 en el sur del AMM.....	42
	4.3.1 Distribución de tamaño de PM <sub>10</sub> .....	43
	4.3.2 Distribución de volumen de PM <sub>10</sub> .....	44
	4.3.3 Concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	46
4.4	Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en el periodo de invierno en Santa Catarina.....	48
	4.4.1 Distribución de tamaño de PM <sub>10</sub> .....	49
	4.4.2 Distribución de volumen de PM <sub>10</sub> .....	50
	4.4.3 Concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	51
4.5	Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el periodo primavera-verano en el sur del AMM.....	52
	4.5.1 Distribución de tamaño.....	53
	4.5.2 Distribución de volumen.....	54

4.5.3	Concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	56
4.6	Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el periodo primavera-verano en Santa Catarina.....	58
4.6.1	Distribución de tamaño de partículas.....	59
4.6.2	Distribución de volumen.....	60
4.6.3	Concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	62
4.7	Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> durante el monitoreo de otoño en Santa Catarina .....	63
4.7.1	Distribución de tamaño.....	64
4.7.2	Distribución de volumen.....	65
5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIACIONES ESTACIONALES Y ESPACIALES DE LAS DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	69
5.1	Datos de monitoreo por sitio y época del año.....	69
5.1.1	Monitoreo de invierno.....	70
5.1.2	Monitoreo de primavera-verano.....	70
5.1.3	Monitoreo de otoño.....	72
5.2	Análisis de la variación espacial y estacional de las distribuciones de tamaño de partículas.....	73
5.2.1	Evaluación de variación espacial.....	73
5.2.2	Evaluación de la variación estacional.....	81
	Conclusiones y recomendaciones .....	95
	Referencias .....	97
	Anexo A. Gráficas de valores totales de cantidad de PM <sub>10</sub> .....	102
	Anexo B. Caracterización química y toxicológica.....	105
	Vita .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Días sobre la norma de PM10 en cada zona del AMM.....	2
Figura 3.1	Nefelómetro óptico (DataRAM 4).....	19
Figura 3.2	Imagen del equipo Partisol-Plus modelo 2025.....	20
Figura 4.1	Estaciones de monitoreo ambiental del SIMA en el AMM.....	32
Figura 4.2	Valores promedios de concentración para PM <sub>10</sub> durante el periodo de invierno en el AMM (1 al 20 de Marzo, 2005).....	33
Figura 4.3	Valores promedios de concentración para PM <sub>10</sub> durante el periodo de primavera-verano en el AMM (3 de Junio al 2 de Julio, 2005).....	34
Figura 4.4	Valores promedios de concentración para PM <sub>10</sub> durante el periodo de otoño en el AMM (3 al 14 de Noviembre, 2005).....	35
Figura 4.5	Valores promedios de concentración para PM <sub>2,5</sub> durante el periodo de invierno en el AMM (1 al 20 de Marzo, 2005).....	37
Figura 4.6	Valores promedios de concentración para PM <sub>2,5</sub> durante el periodo primavera-verano en el AMM (3 de Junio al 2 de Julio, 2005).....	38
Figura 4.7	Valores promedios de concentración para PM <sub>2,5</sub> durante el periodo de otoño en el AMM (2 al 14 de Noviembre, 2005).....	40
Figura 4.8	Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.....	44
Figura 4.9	Fracción de volumen de partículas del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.....	45
Figura 4.10	Relación de PM <sub>2,5</sub> /PM <sub>10</sub> del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.....	46
Figura 4.11	Perfil diario de concentraciones de PM <sub>2,5</sub> del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.....	47
Figura 4.12	Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500 del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.....	48

Figura 4.13	Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	49
Figura 4.14	Fracción de volumen de partículas del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	50
Figura 4.15	Relación de $PM_{2.5}/PM_{10}$ del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	51
Figura 4.16	Perfil diario de concentraciones de $PM_{2.5}$ del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	52
Figura 4.17	Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 400 y el CI-500 del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	53
Figura 4.18	Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.....	54
Figura 4.19	Fracción de volumen de partículas del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.	55
Figura 4.20	Relación de $PM_{2.5}/PM_{10}$ del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.....	56
Figura 4.21	Perfil diario de concentraciones de $PM_{2.5}$ del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.	57
Figura 4.22	Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500 del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.....	58
Figura 4.23	Fracción del tamaño de partículas del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.....	59
Figura 4.24	Fracción de volumen de partículas del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005..	60
Figura 4.25	Relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.....	61
Figura 4.26	Perfil de concentraciones de $PM_{2.5}$ del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.	62
Figura 4.27	Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500	

	del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.....	63
Figura 4.28	Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.....	64
Figura 4.29	Fracción de volumen de partículas del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.....	65
Figura 4.30	Relación de $PM_{2.5}/PM_{10}$ del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.....	66
Figura 4.31	Correlación obtenida entre los datos de volumen y concentración de los monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM y en Santa Catarina.....	67
Figura 5.1	Diagrama de caja y bigotes.....	69
Figura 5.2	Diagramas de caja para los datos del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 1 al 9 de Marzo del 2005.....	70
Figura 5.3	Diagramas de caja para los datos del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.....	71
Figura 5.4	Diagramas de caja para los datos del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.....	71
Figura 5.5	Diagramas de caja para los datos del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 14 al 23 de Junio del 2005.....	72
Figura 5.6	Diagramas de caja para los datos del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.....	73
Figura A.1	Cantidades totales de $PM_{10}$ contadas con el Climet durante el monitoreo de invierno en el sur del AMM.....	102
Figura A.2	Cantidades totales de $PM_{10}$ contadas con el Climet durante el monitoreo de invierno en Santa Catarina.....	103
Figura A.3	Cantidades totales de $PM_{10}$ contadas con el Climet durante el monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM.....	103
Figura A.4	Cantidades totales de $PM_{10}$ contadas con el Climet durante el	104

	monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina.....	
Figura A.5	Cantidades totales de PM <sub>10</sub> contadas con el Climet durante el monitoreo de otoño en Santa Catarina.....	104
Figura B.1	Pérdida de células expuestas a PM <sub>10</sub> de la ZMVM y del AMM.....	107
Figura B.2	Porcentaje de hemólisis en eritrocitos expuestos a PM <sub>10</sub> de Ciudad de México y Monterrey.....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire .....	8
Tabla 2.2	Características de las partículas.....	10
Tabla 2.3	Zonas de deposición de las partículas en el organismo humano .....	11
Tabla 3.1	Gradiente usado para la detección de los HPAs en las muestras de cada monitoreo realizado en el AMM y en Santa Catarina.....	27
Tabla 4.1	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>10</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de invierno del 2004 en el AMM.....	36
Tabla 4.2	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>10</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de primavera-verano del 2005 en el AMM.....	36
Tabla 4.3	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>10</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de otoño del 2005 en el AMM.....	37
Tabla 4.4	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de invierno del 2004 en el AMM.....	41
Tabla 4.5	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de primavera-verano del 2005 en el AMM.....	42
Tabla 4.6	Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM <sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de otoño del 2005 en el AMM.....	42
Tabla 5.1	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los datos del monitoreo de invierno.....	75
Tabla 5.2	Análisis de varianzas de cada población en invierno.....	76

Tabla 5.3	Resultados de la prueba t para las 2 poblaciones de datos obtenidos en los monitoreos de invierno.....	77
Tabla 5.4	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los datos del monitoreo de primavera-verano.....	79
Tabla 5.5	Análisis de las varianzas de cada población en primavera-verano.....	80
Tabla 5.6	Resultados de la prueba t para las 2 poblaciones de datos obtenidas en los monitoreos de primavera-verano.....	81
Tabla 5.7	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.....	82
Tabla 5.8	Resultados de la prueba de diferencias en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.....	83
Tabla 5.9	Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.....	84
Tabla 5.10	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y primavera-verano en Santa Catarina.....	85
Tabla 5.11	Resultados de la prueba de diferencias en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y primavera-verano en Santa Catarina.....	86
Tabla 5.12	Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras de invierno y el primavera-verano en Santa Catarina.....	87
Tabla 5.13	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de primavera-verano y otoño en Santa Catarina.....	88
Tabla 5.14	Resultados de la prueba de diferencia en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de primavera-verano y otoño en Santa Catarina.....	89
Tabla 5.15	Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de primavera-verano y otoño en Santa Catarina.....	90
Tabla 5.16	Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y otoño en Santa Catarina.....	91



Tabla 5.17	Resultados de la prueba de diferencia en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y otoño en Santa Catarina.....	92
Tabla 5.18	Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y otoño en Santa Catarina.....	93
Tabla B.1	Hidrocarburos poliaromáticos detectados en las muestras recuperadas en cada monitoreo durante las 3 épocas de análisis.....	106

## NOMENCLATURA

- V** Volumen calculado a partir de los datos obtenidos con el Climet para cada rango de tamaño de partícula [ $\mu\text{m}^3$ ].
- n** Cantidad de partículas medidas.
- $\bar{D}_p$  Diámetro promedio de partícula [ $\mu\text{m}$ ].
- $\bar{V}_p$  Volumen promedio de partículas [ $\mu\text{m}^3$ ].
- C** Concentración de partículas medidas con el Data RAM 4000 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].
- $\bar{C}$ , Concentración promedio de partículas [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].
- Q** Cantidad total de datos de concentración.

## **CAPÍTULO 1**

### **CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY**

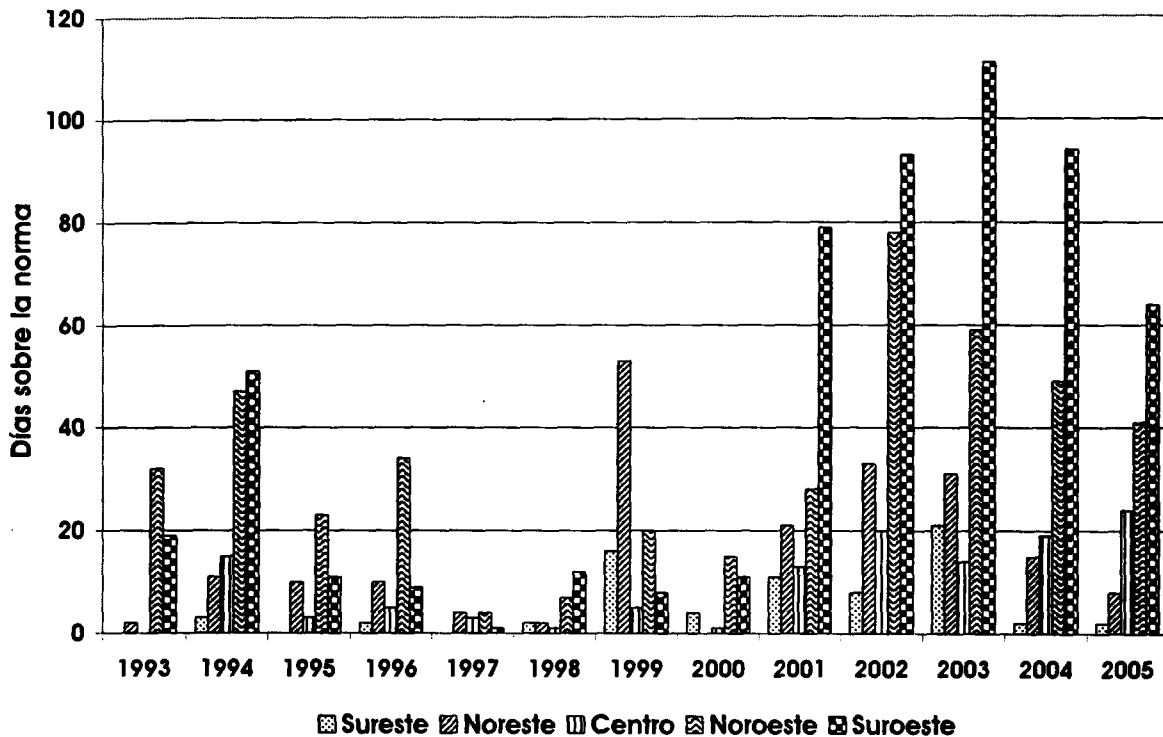
#### **1.1 Introducción.**

Numerosos estudios muestran evidencias acerca del efecto nocivo de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  sobre la salud del ser humano, especialmente de aquellos que habitan en ciudades con un fuerte desarrollo industrial y un crecimiento urbano acelerado. En nuestro país, la Ciudad de México ha sido objeto de numerosos estudios ambientales enfocados a disminuir los niveles de contaminación ambiental (Gómez Perales et al, 2004; Vega et al, 2004; Osornio-Vargas et al, 2003; Chow et al, 2002; Cicero-Fernández et al, 2001.). De forma similar, ciudades como Guadalajara y Monterrey han tenido un auge industrial que se ha visto reflejado en su participación, cada vez mayor dentro de la actividad económica de la nación, lo que ha ocurrido a costa del deterioro ambiental (Jiménez, 2001).

En este capítulo se discute acerca de los contaminantes que se encuentran en el aire y de la materia particulada en el área metropolitana de Monterrey (AMM).

##### **1.1.1 La contaminación atmosférica en Monterrey.**

Monterrey y su área metropolitana han tenido en los últimos años un gran desarrollo urbano e industrial. Según datos del INEGI actualizados al año 2003, están contabilizadas más de 9000 industrias, además de los establecimientos comerciales y de servicios. Su población es mayor a los 3 millones de habitantes y crece de forma acelerada a un ritmo de 3% anual aproximadamente. Tiene una circulación vehicular de 915,824 automóviles particulares y 404,155 camiones y camionetas de carga. Todos estos factores han venido deteriorando y alterando la calidad del aire, ocasionando que se eleven las concentraciones de contaminantes por arriba de los límites máximos permitidos por las normas de calidad del aire.



**Figura 1.1** Días sobre la norma de  $PM_{10}$  en cada zona del AMM.

Los datos del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) indican que en el periodo de 1993 a 2005 las  $PM_{10}$  fueron el contaminante con más días por encima de la norma en el área metropolitana de Monterrey (AMM). Hasta Septiembre del año actual en Santa Catarina es donde se registraron las incidencias más altas con un total de 64 días. En seguida de esta se encuentra la zona Noroeste (San Bernabé) con 41 días, y la zona Centro (Obispa) con 24 días sobre la norma. El Sureste, la zona de la Pastora, fue la zona que presentó menos incidencias de violación a la norma ambiental. (SITE).

El SIMA tiene una base de datos en la que se registran las concentraciones de  $PM_{10}$  desde 1993 y de  $PM_{2.5}$  desde el 2003 a la fecha. Es necesario contar con un inventario de emisiones actualizado, pues no se ha actualizado desde 1995, que permita al gobierno plantear estrategias nuevas para disminuir el impacto que estas partículas tienen sobre la población. Además hace falta analizar el grado en que estas han repercutido sobre la salud de la sociedad regiomontana. También es necesario detectar las fuentes de emisión de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , caracterizarlas y evaluar la dispersión de estas partículas junto con el impacto que estas

partículas tienen en la salud de la población junto con los costos y beneficios que implica imponer medidas que disminuyan las fuentes de emisiones de estas partículas.

Este trabajo es un primer esfuerzo por caracterizar las concentraciones y las variaciones de tamaño diurnas, espaciales y estacionales de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el medio ambiente de Monterrey y su área metropolitana. Sería recomendable que se llevaran a cabo otras investigaciones simultáneamente pero que estuvieran enfocadas a correlacionar los efectos de estas partículas en la salud, en especial de los niños, con el comportamiento de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General.**

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar física y químicamente las  $PM_{2.5}$  en el área metropolitana de Monterrey durante diferentes épocas del año, determinando las distribuciones de tamaño, volumen y concentración de  $PM_{2.5}$  y las distribuciones de tamaño y volumen de  $PM_{10}$ .

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

1. Obtener la distribución de tamaño de partícula para  $PM_{10}$  y la concentración por horas, días y regiones de  $PM_{2.5}$ .
2. Evaluar diferencias espaciales y temporales de las distribuciones de tamaño y volumen de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  entre épocas y sitios de monitoreo.
3. Identificar los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) y sus cantidades presentes en una serie de muestras representativas obtenidas de los monitoreos para cada una de las estaciones del año y en cada estación de monitoreo seleccionada.

### **1.3 Alcance.**

El estudio reportado se llevó a cabo en la ciudad de Monterrey y su área metropolitana tomando 2 zonas dentro de esta región como sitios de monitoreo. El contaminante estudiado es la materia particulada ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y dentro de este tipo de contaminantes se detectaron 16 hidrocarburos utilizando el método EPA 8270/1994.

Se llevaron a cabo 3 campañas de monitoreo en invierno, primavera-verano y otoño del año 2005, tomando muestras en 2 sitios de monitoreo localizados en el área metropolitana de Monterrey. En cada una de las campañas se emplearon 3 equipos para la medición y el monitoreo de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Para medir la concentración de  $PM_{2.5}$  se usó un nefelómetro óptico, además de un equipo contador de partículas el cual abarca distintos intervalos desde  $0.5 \mu m$  hasta  $10 \mu m$ . Para poder obtener muestras que pudieran analizarse químicamente para identificar los hidrocarburos presentes en la muestra de  $PM_{2.5}$ , se empleó un muestreador secuencial de aire. Se trató de tener al menos 8 días de monitoreo continuo en ambos sitios durante las 3 campañas de monitoreo de tal manera que se pudieran acumular 4 registros por hora del equipo contador de partículas, 6 registros por hora del equipo medidor de concentración de  $PM_{2.5}$  y un filtro expuesto durante 24 horas por parte del equipo muestreador secuencial de aire. Los aspectos técnicos de estos equipos se detallan en el Capítulo III de este reporte, en el mismo capítulo se describen las técnicas estadísticas y químicas usadas para el análisis de datos y filtros respectivamente.

Los resultados de la investigación se muestran en el Capítulo IV en lo que respecta a la caracterización física de las muestras, el Capítulo V contiene la discusión de los resultados del análisis químico de los filtros con muestra. Los resultados de ambos capítulos indican que es necesario muestrear en varios sitios del área metropolitana de Monterrey y en distintas épocas del año para caracterizar la materia particulada contenida en el aire de la ciudad, la evidencia estadística no indica que haya relación entre los datos de los sitios de monitoreo para una misma época del año. No se tiene relación tampoco entre los datos obtenidos en un mismo sitio de monitoreo pero en diferentes campañas de monitoreo. Esto lleva a la conclusión de que la caracterización adecuada, tanto física como química, de la materia particulada en la

atmósfera de Monterrey requiere de llevar a cabo campañas de monitoreo en diferentes puntos de Monterrey y del área metropolitana, esto también debe hacerse en diferentes épocas del año, pues en el reporte se muestra que los resultados se ven afectados según la época en que se lleva a cabo la campaña de monitoreo.

## CAPÍTULO 2

### GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y PARTÍCULAS

En este capítulo se darán antecedentes históricos de la contaminación por partículas en el aire, demostrando que el problema se ha venido agravando con el desarrollo industrial de la sociedad y que esta ha sufrido las consecuencias de dicha contaminación con efectos nocivos en su salud. Los efectos de las partículas sobre la salud humana se relatan en una sección del capítulo donde además se mencionan los efectos que estas partículas pueden tener sobre los inmuebles, las plantas y los animales.

Además se da una descripción acerca de la investigación hecha en México sobre la materia particulada, en especial en la Ciudad de México donde ya se ha estudiado con mayor profundidad este tema y sus efectos en la salud de la población. Como se muestra en el capítulo, la preocupación que generan los efectos de la materia particulada ha motivado muchas investigaciones en diferentes países enfocadas a profundizar en el conocimiento de los efectos en la salud debidos a la exposición a la materia particulada, en especial a aquella con un tamaño menor a  $2.5 \mu\text{m}$  ya que se considera a esta fracción la más peligrosa para el ser humano.

#### **2.1 Antecedentes sobre la contaminación del aire.**

La contaminación del aire no es un fenómeno reciente. En 1272, el rey Eduardo I de Inglaterra prohibió la quema del “carbón marítimo”, llamado así porque se transportaba por vía marítima, a fin de limpiar el cielo lleno de humo en Londres (Wark, 2001). Fue hasta los reinados de Ricardo II y Enrique V que surgieron en esa nación las primeras medidas y reglamentaciones en el uso del carbón (Wark, 2001). El uso del carbón para generar energía fue un importante factor durante la revolución industrial, base sobre la que está formada nuestra sociedad tecnológica actual (Wark, 2001). En Los Ángeles, se detectó una fuerte contaminación del aire en 1943, a pesar de lo anterior. Fue hasta 1984 cuando se promulgó una ley que controla las fuentes de emisiones fijas (Rivera, 2001). En 1895, en los Estados



Unidos, cuando surge el primer intento por controlar la contaminación al emitirse una ordenanza que consideraba ilegal que los autos de vapor emitieran a este por sus escapes (Wark, 2001).

Sin embargo, muchos años antes, ya se habían presentado episodios graves en los cuales la contaminación del aire representó un papel relevante. En grandes ciudades como Londres, Manchester, Pennsylvania y Bélgica se presentaron numerosos casos de muertes luego de que estas zonas urbanas fueron cubiertas por espesas nubes negras provocadas principalmente por la actividad industrial de las zonas. En estas ciudades el sector industrial en el siglo XIX usaba el carbón como principal combustible, con duración de hasta por 9 días (Wark, 2001).

## **2.2 Clasificación de los contaminantes.**

De manera general, los contaminantes en el aire se clasifican como:

1. Partículas.
2. Gases.
3. Compuestos radiactivos.

La materia particulada se divide en subclases. Aquellas cuyo diámetro es menor a 2.5  $\mu\text{m}$  se denominan polvos finos, y polvos gruesos aquellas que su diámetro resulta mayor a la medida anterior. Los vapores son aquellas partículas cuyo tamaño oscila entre 1 y 0.001  $\mu\text{m}$ . En el caso de las neblinas, se consideran las partículas que su diámetro se encuentra entre 0.1 y 10  $\mu\text{m}$  (Wark, 2001).

Los contaminantes atmosféricos pueden ser clasificados también como se les encuentra en la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 1998):

1. Contaminantes primarios. Son emitidos directamente por las fuentes.

2. Contaminantes secundarios. Se forman en la atmósfera a causa de las interacciones químicas entre los contaminantes primarios y los constituyentes normales de la atmósfera.

Ejemplos de gases contaminantes primarios y secundarios presentes en el aire se muestran en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1 Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire.**

Compuestos	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Azufrados	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Orgánicos	Compuestos C <sub>1</sub> a C <sub>5</sub>	Cetonas, aldehídos, ácidos, etcétera.
Nitrogenados	NO, NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Óxidos de carbono	CO, CO <sub>2</sub>	Ninguno
Halogenados	HCl, HF	Ninguno

### 2.3 Efectos de las partículas atmosféricas.

Las partículas suspendidas en el aire pueden ser, por si mismas, químicamente activas o inertes, ya que pueden absorber sustancias químicamente activas en la atmósfera o combinarse para formar especies químicamente activas. Las partículas pueden causar daños químicos directos como la corrosión (Strauss, 1986). Poco es lo que se conoce de los efectos de las partículas en general sobre la vegetación. Se ha observado que las partículas fluoradas causan daños en las plantas y que el óxido de magnesio que cae sobre los terrenos agrícolas causa una disminución en el crecimiento de las plantas (Wark, 2001). Los efectos de las partículas repercuten en los animales de manera directa cuando estos respiran el aire contaminado o al alimentarse de alguna planta cuyos tejidos han sido afectados por algún tóxico en particular, o bien porque este tóxico permanece en la superficie de la planta. Se piensa que la fluorosis en los animales se debe a que estos ingieren plantas cubiertas con partículas que contienen flúor (Wark, 2001). El ganado vacuno y bovino que consume la vegetación contaminada con arsénico, a menudo muere a causa del envenenamiento provocado por este compuesto (Wark, 2001).

La salud humana también se encuentra amenazada por las partículas. Las partículas solas o combinadas con otros contaminantes representan un grave peligro para la salud. En la Ciudad de México, la exposición de sus habitantes a la materia particulada se ha asociado a con la mortalidad y el deterioro de la salud de los mismos (Cicero-Fernández et al, 2001). Los análisis estadísticos de los datos sobre el aumento en ingresos a hospitales y clínicas, ausencias del trabajo y escuelas, mortalidad, productividad, etcétera, se correlacionan con los de concentraciones medidas de los contaminantes que prevalecían durante los periodos en que el paciente estuvo en observación. Lo anterior pone de manifiesto lo difícil que resulta obtener una relación directa entre la exposición a varias concentraciones de partículas y los efectos resultantes sobre la salud del hombre (Cicero-Fernández et al, 2001).

Las partículas pueden tener un efecto tóxico de una o más de las maneras siguientes:

1. La partícula puede ser intrínsecamente tóxica debido a sus características inherentes químicas y/o físicas.
2. La partícula puede interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. La partícula puede actuar como un conductor a una sustancia tóxica absorbida.

En la Tabla 2.2 se listan efectos de las partículas de una manera condensada (Wark, 2001):

El tamaño de la partícula es la característica física más importante para determinar su impacto en la salud. Las partículas que miden más de 10  $\mu\text{m}$  se retienen en las vías respiratorias superiores.

Las partículas que son menores a este tamaño predominan en la fracción respirable y pueden llegar a penetrar el espacio alveolar del pulmón. A estas partículas se les considera capaces de bloquear los mecanismos de defensa del aparato respiratorio a nivel de vías aéreas superiores y alvéolos (NOM-025-SSA1-1993).

**Tabla 2.2 Características de las partículas.**

Concentración	Tiempo de medición	Efectos
60 a 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media geométrica anual, con $\text{SO}_2$ y humedad	Aceleración en la corrosión de láminas de acero y zinc
150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Humedad relativa menor al 70%	Visibilidad reducida a 5 millas
100 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Humedad relativa menor al 70%	Luz solar directa reducida en un tercio
80 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Con niveles de sulfatación de 30 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$	Probabilidad de aumento en la tasa de mortalidad de personas mayores de 50 años
100 a 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Con $\text{SO}_2$ mayor a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Posibilidad del aumento en la incidencia de las enfermedades respiratorias en los niños
200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio de 24 horas y $\text{SO}_2$ mayor a 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	La deficiente salud de los obreros puede ser una causa del ausentismo laboral
300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo de 24 horas y $\text{SO}_2$ mayor a 630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Los pacientes con bronquitis crónica son propensos a mostrar un empeoramiento agudo en sus síntomas
750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio de 24 horas y $\text{SO}_2$ mayor a 715 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Puede ocurrir un número excesivo de muertes y un aumento considerable en las enfermedades

La Tabla 2.3 muestra las zonas de deposición de partículas en el organismo (Seinfeld y Pandis, 1998).

**Tabla 2.3 Zonas de deposición de las partículas en el organismo humano.**

Región.	Diámetro de la partícula [ $\mu\text{m}$ ]
Cabeza (boca, nariz, mucosidad nasal)	Mayor a 10
Vías respiratorias (tráquea)	Mayor a 5 pero menor a 10
Pulmonar (pulmones, alvéolos, bronquiolos)	Menor a 5

Además de lo mencionado anteriormente, otro factor importante de la materia particulada es su efecto tóxico. El trabajo de Osornio y colaboradores en Ciudad de México ha demostrado que las  $\text{PM}_{10}$  poseen mayores cantidades de toxinas que causan daños a nivel celular en comparación de las  $\text{PM}_{2.5}$ , probablemente por los metales de transición que forman parte de las  $\text{PM}_{10}$  (Osornio et al., 2003).

#### **2.4 La investigación sobre materia particulada en México.**

El Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCA) es una de las más grandes e importantes áreas urbanas en desarrollo con serios problemas de contaminación del aire. El AMCA ha sido sujeto de muchas investigaciones con respecto a la calidad del aire. Entre estas investigaciones los estudios de la exposición humana al material particulado se ha asociado con mortalidad y morbilidad en la Ciudad de México (Cicero-Fernández, 2001). Esto causo que al estándar de exposición por 24 horas para partículas con diámetro aerodinámico menor a  $10 \mu\text{m}$  se aprobara su modificación de  $150$  a  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Junio del 2005. En esa misma fecha, se estableció un estándar de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en promedio para 24 horas de exposición a las partículas con un diámetro menor a  $2.5 \mu\text{m}$  (NOM-025-SSA1-1993) en una exposición aguda una vez al año. Las investigaciones realizadas para el AMCA han tocado diversos factores de la problemática. Por ejemplo, el trabajo de Chow y colaboradores (2002) han determinado que los niveles de  $\text{PM}_{10}$  en los interiores de los hogares de la Ciudad de México son mayores que en el exterior, especialmente en las viviendas cercanas a caminos de terracería. El impacto del transporte público sobre sus usuarios también ha sido objeto de estudio en el tema de materia particulada, los niveles de  $\text{PM}_{2.5}$  medidos en los viajes y estaciones de distintos medios de transporte público, como minibuses, autobuses y metro, registran niveles entre  $12$  y  $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(Gómez-Perales et al., 2004). En las muestras el carbono orgánico es el componente que más predomina con alrededor del 50%, seguido del sulfato con 21%. Esta alta concentración puede ser atribuible a las 22, 466 toneladas de bióxido de azufre liberado a la atmósfera de la ciudad cada año (Gómez-Perales et al., 2004). Estas conclusiones son consistentes con la investigación de Vega y colaboradores (2004). En ellos concuerdan los hechos de que en las  $PM_{2.5}$  predominan los compuestos orgánicos emitidos por la combustión en los motores de los diversos medios de transporte, siendo consistente también en la proporción de los compuestos azufrados del total de la muestra.

Además de la Ciudad de México, otras ciudades con una gran densidad de población como Guadalajara y Monterrey, y ciudades de tamaño mediano (Toluca, Cd. Juárez, Mexicali y Tijuana) han sido tomadas en cuenta para la caracterización física de  $PM_{10}$  y de otros contaminantes criterio. A pesar de las diferencias poblacionales entre estas ciudades todas ellas registraron violaciones a la norma anual de partículas suspendidas totales (PST) durante 1996, aunque no se discrimina en el tamaño de partículas del reporte debido a que en algunas de las ciudades no se cuenta con la infraestructura necesaria para la determinación de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . El reporte de González (2000) señala que las principales fuentes de estas partículas son naturales. Para el caso de la AMCA, en el cual las fuentes naturales aportan la mayor cantidad de  $PM_{10}$  con un 56.7% del total en 1996, mientras que en Mexicali las PST figuran alrededor del 30% del total de la muestra.

## **2.5 Panorama mundial del problema de la materia particulada en la atmósfera.**

El problema de contaminación por partículas es muy común en las grandes capitales y las fuentes de estas partículas pueden ser muy diversas e inclusive de fuentes muy lejanas. Por ejemplo se puede mencionar el caso de Madrid donde los niveles de estas partículas aumentan durante los procesos de transporte de arena de los desiertos de África del norte (Artiñano et al., 2003; Querol et al., 1998).

Los efectos nocivos sobre la salud que tienen las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  han sido temas de diferentes investigaciones en todo el mundo. Estos estudios resaltan la importancia de su

caracterización física y química a fin de establecer cuales son sus posibles fuentes de emisión y sus impactos en la salud, ecosistemas y materiales. En Europa, países como Alemania y España reportan concentraciones mínimas y máximas de  $PM_{2.5}$  entre 20 y  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en sitios urbanos, estando entre las naciones con más altos valores de concentración en estos lugares. En sitios interiores de la ciudad, donde se hayan fuentes importantes de contaminación, las dos naciones anteriores junto con Austria reportan medidas de concentración de  $PM_{2.5}$  entre 25 y  $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Querol et al., 2004).

En el caso de  $PM_{10}$  nuevamente Alemania y España destacan por sus concentraciones de las demás naciones, sus promedios anuales oscilan entre 28 y  $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para los sitios urbanos mientras que alrededor de fuentes de contaminación en estos países, junto con Austria, las concentraciones anuales reportan valores de 37 a  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Querol et al., 2004). También los resultados de la investigación de Querol y colaboradores en el 2004 demuestran que en Suecia se registran los valores de concentración más pequeños tanto en  $PM_{10}$  como en  $PM_{2.5}$ . Las fuentes de estas partículas son muy variadas dependiendo de que país se trate. En Madrid la principal fuente de estas partículas es la combustión generada por los vehículos según el análisis químico de las muestras donde predomina el carbón no mineral. Eventos naturales, como el transporte del polvo proveniente del Sahara incrementan de manera significativa los niveles de materia particulada, especialmente las  $PM_{10}$  debido a la carga mineral del polvo (Artiñano, 2003).

Alemania es una nación que muestra preocupación especialmente por la composición química y la toxicidad de las especies que forman las partículas finas en la atmósfera de ese país (Zereini et al., 2005). En Frankfurt y su área metropolitana las partículas menores a  $10 \mu\text{m}$  cuentan dentro de su composición con metales como cadmio, plomo, vanadio, cromo, zinc y níquel. Los investigadores se encuentran particularmente preocupados por aquellas partículas con diámetros menores a  $2.1 \mu\text{m}$  ya que los metales que predominan entre estas son el plomo, cadmio y vanadio; además de que estas partículas tienen largos tiempos de residencia en la atmósfera y son las que penetran con más facilidad a la profundidad de los pulmones durante la inhalación, lo cual es un factor sumamente importante en la evaluación de

riesgos a la salud pues las especies metálicas, y sus compuestos predominan en estas muestras y muchas son consideradas carcinogénicas (Zereini et al., 2005).

En Europa existen 21 centros de estudio que han logrado diseñar una metodología para la evaluación de  $PM_{2.5}$ . Los primeros resultados fueron obtenidos durante el invierno del 2002 y se enfoca como una propuesta eficiente y viable para abatir la contaminación en el continente europeo (Hazenkamp-von Arx, 2003).

Los países asiáticos también han realizado estudios enfocados a obtener la caracterización física y química de la materia particulada. Investigaciones llevadas a cabo en Manila, Filipinas; en Hong Kong, China; en Isla, Cheju Corea del Sur; en Hanoi, Vietnam y en la Isla Sado en la costa oeste de Japón mostraron que todos los sitios con excepción del último tienen concentraciones anuales promedio por arriba de la norma de la EPA para  $PM_{2.5}$ , que es de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Destacan el caso de Manila y Hanoi que reportan concentraciones promedio anuales de  $45 \pm 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $42 \pm 26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Cohen et al., 2002). El análisis químico indica que los principales elementos que constituyen el 70% de las partículas finas son carbón elemental y sulfuro de amonio los cuales son productos de la combustión de carbón, material vegetal y el transporte; el calcio es otro elemento encontrado en las muestras cuya presencia puede deberse a actividades de construcción o a la producción de cementos. Los análisis de las muestras revelan también que la materia orgánica y el rocío marino son otros 2 componentes que predominan en la atmósfera asiática (Cohen et al., 2002).

En los Estados Unidos y Canadá se tienen muchos estudios hechos sobre el problema ambiental y de salud que representa la materia particulada, especialmente la fracción menor a  $2.5 \mu\text{m}$ . A lo largo de todo Estados Unidos las investigaciones más divulgadas se centran en la caracterización física de  $PM_{2.5}$  y su correlación con otros contaminantes como el bióxido de azufre (Kim et al., 2002; Walsh y Sherwell, 2002) o a estimar la influencia que factores como las variaciones meteorológicas tienen sobre la distribución espacial y temporal de las partículas (DeGaetano y Doherty, 2004; Pinto et al, 2004; Vukovich y Sherwell, 2002). Otras investigaciones muestran evidencia de que actividades humanas como el transporte y las parrilladas elevan los niveles regionales de la materia particulada. Además de que en el caso



de parrilladas este tipo de partículas queda atrapada en los alimentos preparados de esa manera, pudiendo incrementar los niveles por exposición a contaminantes tóxicos (McDonald et al., 2003).

El trabajo de McDonald y colaboradores respecto al problema de materia particulada generada a partir del carbón usado para cocinar muestra relaciones entre  $PM_{2.5}$  y carne cocida con carbón de 4.4 a 11.6 g/kg. Además, encontraron niveles considerables de compuestos orgánicos como hidrocarburos poliaromáticos (HPA) y colesterol en las muestras. De lo anterior, los alimentos cocinados con carbón tienen un contenido mucho mayor de compuestos orgánicos en comparación con aquellos que son preparados en parrillas (McDonald et al., 2003).

Chile es un país con un rápido desarrollo e importantes actividades industriales cerca de áreas urbanas. Esto ha arrojado un problema de contaminación preocupante en lo que a partículas finas se refiere. Las concentraciones promedio anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en ciudades como Valparaíso, Viña del Mar, Rancagua, Temuco y Santiago son mayores que los estándares de calidad del aire establecidos por la Organización Mundial de la Salud o la EPA (Kavouras et al., 2001). La población residente en estas áreas se encuentra expuesta a riesgos en la salud provocados por las altas concentraciones de estas partículas cuyas principales fuentes son el suelo y la partículas de sal de mar para la fracción gruesa, mientras que las partículas finas provienen en su mayoría de la quema de combustibles de los automóviles, además de la quema de la madera y de los desechos agrícolas (Kavouras et al., 2001). Estudios más profundos realizados en Santiago demuestran que los vehículos a gasolina y diesel y la combustión incompleta de combustibles son las principales fuentes de compuestos orgánicos en la materia fina de Santiago; en Temuco, la evidencia muestra que las fuentes de combustión móviles y la calefacción doméstica (incluyendo la quema de leña) son las fuentes más importantes de aerosol orgánico, es especial de HPAs (Tsapakis, 2002).

Los estudios discutidos destacan lo importante que es tener una caracterización física y química de las partículas que permitan identificar a las principales especies de las muestras a fin de establecer el impacto tóxico que estas pueden tener sobre la salud de la sociedad. Los

resultados de todos estos estudios pueden ser usados para evaluar el riesgo por exposición a la contaminación del aire y a desarrollar estrategias de control efectivas en relación a sus costos.

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

En esta sección se trata acerca de los sitios en los cuales se realizaron las campañas de monitoreos durante las épocas de invierno del 2004, y primavera-verano y otoño del 2005. Además se dan las especificaciones técnicas de cada uno de los 3 equipos usados en las campañas de monitoreo en la sección 3.2.

También se especifican las técnicas estadísticas usadas para el análisis de los datos registrados por los equipos en cada campaña en la sección 3.3. En la sección 3.4 se mencionan los detalles de la técnica de HPLC usada para el análisis químico de las muestras recuperadas por el muestreador secuencial de aire Partisol Plus 2025. En la campaña de monitoreo de otoño se empleó un equipo muestreador de aire de alto volumen con el cual se obtuvieron una serie de filtros con una cantidad de muestra mayor que las que recupera el Partisol usado en las 3 campañas, esos filtros fueron sometidos a análisis específicos para toxicidad en las muestras.

#### **3.1 Descripción general.**

La toma de muestras y datos se llevo a cabo en tres campañas de monitoreo en dos lugares seleccionados del área metropolitana de Monterrey. Estas campañas fueron llevadas a cabo durante tres estaciones del año: invierno, primavera-verano y otoño. En estos periodos se utilizaron tres equipos de muestreo de partículas. Para determinar los tamaños de  $PM_{10}$  se usó un contador de partículas Climet CI-500. La concentración de  $PM_{2.5}$  se midió en tiempo real mediante un nefelómetro óptico Data RAM 4. Simultáneamente, se tomaron muestras de  $PM_{2.5}$  mediante un muestreador secuencial de aire Partisol Plus 2025. Las características técnicas de estos equipos se describen en la sección 3.2.

El objetivo fue conseguir al menos ocho muestras diarias de cada sitio en cada campaña. Con el Climet y el Data RAM 4000 se tomaron mediciones continuas a lo largo del

día según la programación asignada a cada equipo que se describe en la sección 3.2. Los equipos se colocaron en los mismos puntos de muestreo dentro de cada sitio para procurar tener las mismas fuentes de error propiciadas por la ubicación de los equipos en los muestreos realizados.

### **3.2 Descripción técnica de los equipos usados en la investigación.**

#### **3.2.1 Equipo para la medición de concentración de las partículas $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ .**

El equipo empleado para obtener la caracterización de partículas en tiempo real es un muestreador óptico de partículas Data RAM 4000 marca Termo el cual se muestra en la Figura 3.1. Este equipo incluye instrumentos que emplean las propiedades de dispersión de la luz como una forma de medir la concentración de partículas. Operan midiendo la dispersión de la luz de una población grande de partículas en un tiempo determinado o bien, detectando un pulso de luz dispersado por una partícula sencilla, lo que arroja una lectura directa que proporciona la concentración de partículas o distribución de tamaño en tiempo real (Murphy, 1984).

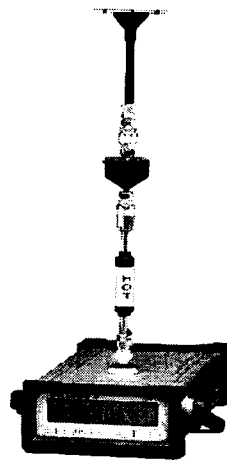
El Data RAM 4000 es un nefelómetro de 2 longitudes de onda con un recolector activo de muestras de aire. Posee un sistema óptico patentado que incorpora 2 fuentes de iluminación (diodos emisores de luz). Una de estas emite a una longitud máxima de 660 nanómetros (rojo) y la otra a 880 nanómetros en la región cercana al infrarrojo. Los rayos de luz de estas 2 fuentes son enfocados mediante su sistema de lentes correspondientes, de tal forma que los rayos iluminen la misma porción axial del flujo de aire.

Los ejes de las 2 lámparas son angularmente simétricos con respecto al eje del detector común, el cual analiza la luz dispersada por las partículas que pasan a través del haz de luz. La magnitud de la luz dispersa detectada a cualquiera de las 2 longitudes de onda es directamente proporcional a la cantidad de partículas que pasan a través de la región de análisis del DataRAM 4. Esta región está definida como el volumen de intercepción entre los rayos de luz y el campo de visión del detector. La respuesta es lineal suponiendo que las propiedades

ópticas de la población de partículas permanecen constantes, y que el índice de refracción de las partículas no cambia apreciablemente. En la práctica, sin embargo, y especialmente para la fracción de partículas finas,  $PM_{2.5}$ , en condiciones ambientales el tamaño de la partícula puede tener varios cambios. El efecto del cambio del tamaño de la partícula sobre la señal depende de la relación de ese tamaño con la longitud de onda usada para generar esa dispersión, y también del ancho de la distribución de los tamaños (Termo Electrón Corporation, 2003).

El equipo Data RAM 4000 cuenta con accesorios los cuales permiten que el equipo monitoree partículas suspendidas totales (PST) cuando no se le incorpora un pequeño ciclón el cual solo permite el paso de partículas con un diámetro mayor o igual a  $10\ \mu m$ . Para que el equipo sea capaz de permitir únicamente el corte de partículas menor o igual a  $2.5\ \mu m$  es necesario incorporar un obturador, incluido con el equipo, al mismo ciclón que se utiliza para limitar el corte de  $PM_{10}$  con lo que el Data RAM 4 es capaz de medir la concentración de  $PM_{2.5}$ .

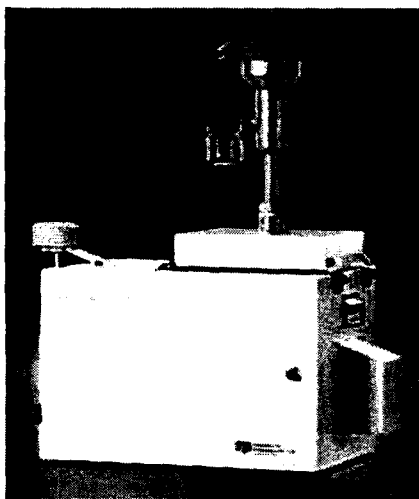
El Data RAM 4000 es capaz de almacenar hasta 50000 series de datos de la concentración, la humedad relativa, el diámetro promedio de la muestra correspondiente a un punto de concentración, la fecha y la hora en que se tomó el punto.



**Figura 3.1 Nefelómetro óptico (DataRAM 4).**

### 3.2.2 Equipo para muestreo secuencial de los contaminantes del aire.

El modelo usado para tomar muestras de  $PM_{2.5}$  fue el Partisol-Plus modelo 2025 fabricado por la compañía Rupprecht and Patashnick. Este es un muestreador de partículas en aire multifiltros de hasta 16 contenedores, de cambio automático según la programación planeada por el usuario. El equipo está diseñado para aplicaciones que requieren el muestreo automático de materia particulada dispersa en el ambiente. Cuenta con los accesorios necesarios para la determinación de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y hasta  $PM_{1}$ . Estos accesorios consisten en un ciclón que permite el paso de partículas con un corte menor o igual a  $2.5 \mu m$ . El ciclón puede ser sustituido por un tubo que permite el paso de las  $PM_{10}$  ya que el impactor que se acopla al equipo solo deja pasar el corte de  $PM_{10}$ . La Figura 3.2 muestra el equipo que se utilizó en las campañas de monitoreo.



**Figura 3.2** Imagen del equipo Partisol-Plus modelo 2025.

Este equipo es útil para la obtención de muestras de contaminantes presentes en el aire. La muestra se colecta en un filtro, del cual se conoce su peso limpio, y, por diferencia, uno puede saber la masa de contaminantes que este colectó dentro de un volumen determinado en un intervalo de tiempo fijo si el objeto del muestreo es realizar un análisis gravimétrico.

La memoria del equipo es capaz de almacenar 40 registros con datos como el flujo de aire tomado durante el tiempo de monitoreo, la temperatura mínima, máxima y el promedio de la misma, lo que también ocurre con la humedad relativa. Si al equipo se acopla un anemómetro se registran las velocidades mínima, máxima y promedio. También se pueden registrar las fallas que pueden surgir al equipo durante el monitoreo y la fecha y hora en que ocurrió la falla, además del motivo de la misma.

### **3.2.3 Contador de partículas.**

El equipo contador de partículas CI-500 fabricado por la compañía Climet Instruments Company se usó determinar las distribuciones de tamaño de  $PM_{10}$ . El equipo determina el número de partículas en los intervalos 0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.5, 2.5-5.0 y 5.0 a 10.0  $\mu m$ . El CI-500 puede variar el tiempo de toma de muestra según el volumen que se requiera analizar. También registra los valores de humedad relativa y temperatura del entorno en que se sitúa el análisis, esto es logrado a través de un complejo conjunto de sistemas que se pueden seccionar para su descripción (Climet Instruments Company, 1996):

- **Sistema óptico:** El sistema cuenta las partículas mediante la detección de la luz dispersada debido al paso de las partículas a través del rayo láser, el cual está enfocado directamente bajo la boquilla de entrada. El sistema óptico colecta la luz dispersada sobre un ángulo amplio que la refleja en un fotodetector. Ya que el detector recibe la luz dispersada desde un ángulo amplio, las variaciones de la respuesta debidas a la forma de la partícula y al índice de refracción son minimizadas.  
El fotodetector y los circuitos asociados convierten la luz colectada a un pulso proporcional al tamaño de la partícula. Estos pulsos se envían a comparadores de voltaje que analizan la amplitud de cada pulso de voltaje a un voltaje de referencia que se determina al momento de la calibración. Si la amplitud del pulso del voltaje es mayor que la amplitud del voltaje de referencia, el pulso se toma como una partícula mayor o igual al valor límite asignado al comparador.

- **Sistema de flujo de aire:** El CI-500 usa un sistema de flujo de aire compacto que minimiza el consumo de energía. Las partículas que entran por la boquilla quedan atrapadas en un filtro HEPA después de pasar a través del sensor de tal forma que las partículas no son expulsadas. Un sensor de flujo másico mide el flujo de entrada y continuamente ajusta la velocidad de la bomba para mantener constante un flujo de 1 ft<sup>3</sup>/min aún si el voltaje de la batería cambia o si restricciones de entrada como filtros, sondas y tubos de muestreo se acoplan al equipo.
- **Sensor de temperatura y humedad relativa:** El aire del ambiente se aspira a través de una abertura y por el sensor de temperatura y humedad. Este consiste en un circuito monolítico integrado el cual mide la humedad al detectar cambios en la capacidad de una delgada película de polímero conforme absorbe las moléculas de agua. La temperatura se mide mediante una delgada lámina de platino RTD.

Este equipo es capaz de almacenar 500 series de datos. Cada serie contiene la cantidad de partículas para cada intervalo de partículas, la humedad relativa, la fecha y la hora en que se toma el registro, el volumen de la muestra, el cual puede ser de 1 ft<sup>3</sup> o de 1 m<sup>3</sup>, ya que el CI-500 puede tomar diferentes volúmenes de muestras, y un identificador del sitio de muestreo, aunque esto último es a elección del usuario del CI-500.

### 3.3 Técnicas de proceso para los datos.

Los datos registrados en la memoria del Climet se utilizaron para calcular las fracciones volumétricas de cada intervalo de tamaño de partícula, hasta un tamaño menor o igual a 10 µm, y en cada uno de los registros guardados por el equipo. Los resultados de estas fracciones fueron sometidos a una prueba estadística de diferencias en las medias que se explica en la sección actual.

Estas comparaciones estadísticas se aplicaron para conocer la variabilidad de las medias en las fracciones de volumen de PM<sub>10</sub> tanto espacial como estacional y poder llegar a



una conclusión acerca del comportamiento de la materia particulada menor a 10 mm presente en la atmósfera de Monterrey y su área metropolitana.

### 3.3.1 Cálculo del volumen y concentración para cada intervalo de partícula.

Los datos que se obtienen con el CI-500 son la cantidad de partículas divididas por intervalo. Una aproximación de la distribución de volumen de cada intervalo de partícula se puede calcular a partir de esta información. El volumen de cada intervalo de tamaño se calcula con la Ecuación (1):

$$V = n * \frac{\pi * \bar{D}_p^3}{6} \quad (1)$$

donde  $n$  es la cantidad de partículas medidas y  $\bar{D}_p$  es el diámetro promedio aerodinámico según el intervalo de partícula para el cual se hace el cálculo (Seinfeld y Pandis, 1998). Este procedimiento se realizó para cada intervalo del CI-500.

Usando los volúmenes calculados con la Ecuación (1) se determinaron las fracciones representativas de cada intervalo de partícula para cada registro. Tomando en cuenta que cada uno de los registros del Climet contiene cinco valores, que corresponden a las divisiones de intervalo de tamaño de partícula, la fracción de volumen de cada uno de los intervalos de tamaño con respecto al volumen global de la muestra se calculó con la Ecuación (2):

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^5 V_i} \quad (2)$$

$\bar{V}_i$  es el volumen promedio de la hora,  $\sum_{i=1}^5 V_i$  es la suma de los volúmenes de cada intervalo de tamaño incluidos en uno de los registros.

La concentración para cada una de las horas del monitoreo se calculó de los datos tomados con el Data RAM 4. Los datos de promedio por hora se calcularon usando la Ecuación (3):

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{Q} \quad (3)$$

en donde  $\bar{C}$  es la concentración promedio de una hora en específico, Q y  $C_i$  es la cantidad total de datos y  $C_i$  es el dato de concentración tomado dentro de la hora para la cual se calcula  $\bar{C}$ .

### 3.3.2 Variaciones estacionales y espaciales de la fracción de volumen de $PM_{10}$ .

Las variaciones estacionales y espaciales en las medias y desviaciones estándar de las muestras de cada monitoreo y para cada sitio se determinaron mediante una serie de pruebas estadísticas. Se comienza aplicando una prueba de varianzas, o prueba de Fisher, a las 2 muestras de las poblaciones a comparar con el objeto de verificar si estas son iguales o diferentes. La primera prueba de hipótesis a probar está dada por las 2 ecuaciones de (4):

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (4)$$

$$H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Donde  $H_0$  es la hipótesis nula que representa la igualdad de la varianza de la población 1 ( $\sigma_1^2$ ) y de población 2 ( $\sigma_2^2$ ), mientras que la hipótesis alterna, representada por  $H_a$ , significa que las varianzas de ambas poblaciones son diferentes. El estadístico F dado por la Ecuación (5) donde  $S_1^2$  y  $S_2^2$  son las varianzas de la muestra, sigue una distribución tipo F con  $n_1-1$  y  $n_2-1$  grados de libertad en el numerador y denominador de la Ecuación (5) se acepta la hipótesis nula.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (5)$$

Entonces, la hipótesis nula se rechaza si

$$F > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \quad (6)$$

$$F < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$$

donde  $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$  y  $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$  son los porcentajes superior e inferior de los porcentajes  $\alpha/2$  y estos valores se obtienen de tablas.

Para este cálculo se empleó el paquete Minitab® 14. El paquete calcula el valor p de la prueba a partir del cual se establece un criterio para apoyar la hipótesis nula, según el valor p obtenido por la prueba de Fisher se tienen 2 opciones para realizar la prueba de hipótesis sobre las medias para 2 poblaciones o prueba t. La primera opción es aceptar la hipótesis nula, lo que implica que las varianzas de las poblaciones sean iguales y se debe de proceder como se muestra a continuación.

Para varianzas iguales ( $S_1^2 = S_2^2$ ) las hipótesis a probar son:

$$H_0: \mu_1^2 = \mu_2^2 \quad (9)$$

$$H_a: \mu_1^2 \neq \mu_2^2$$

Sean  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, S_1^2$  y  $S_2^2$  las medias y las varianzas muestrales de 2 poblaciones, respectivamente. Como tanto  $S_1^2$  y  $S_2^2$  estiman la varianza común  $\sigma^2$ , es posible combinarlas para llegar a un estimado único mediante la Ecuación (10) (Hines et al, 1986):

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (10)$$

A partir de este estimador combinado es posible calcular el estadístico de prueba t para probar la hipótesis nula como se muestra en la Ecuación (11):

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (11)$$

Si  $H_0$  se acepta,  $t_0$  esta distribuida como  $t_{n_1+n_2-2}$ . Por lo tanto, si

$$t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \quad (12)$$

$$t_0 < t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$$

se rechaza la hipótesis nula sobre las medias de la Ecuación (4).

La segunda opción para la prueba de medias ocurre si las varianzas son diferentes, lo que implica rechazar la hipótesis nula. En este caso, el valor estadístico de prueba está dado por la Ecuación (13)

$$t_0^* = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (13)$$

$t_0^*$  se distribuye aproximadamente como t con grados de libertad dados por:

$$v = \frac{\left( \frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1+1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2+1}} - 2 \quad (14)$$

Si  $H_a: S_1^2 \neq S_2^2$  las hipótesis del conjunto de Ecuaciones (9) se prueban como si las varianzas  $S_1^2$  y  $S_2^2$  fueran iguales, excepto que  $t_0^*$  de la Ecuación (13) es usado como el estadístico de prueba t mostrado en la Ecuación (11) y los grados de libertad  $n_1 + n_2 - 2$  se sustituyen por  $v$  mostrado en la Ecuación (14).

Se utilizó el paquete Minitab® 14 para realizar las pruebas explicadas anteriormente de la misma forma en que se usó para las pruebas de Fisher.

### **3.4 Determinación de hidrocarburos poliaromáticos (HPA) por técnica de Cromatografía Líquida de Alto Desempeño (HPLC).**

Las muestras de PM<sub>2.5</sub> fueron analizadas por la técnica de High Performance Liquid Chromatography (HPLC). El equipo empleado para esta parte de la investigación es un modelo de la marca Shimadzu cuyos componentes forman parte de la serie 10-A. El equipo emplea una columna LC-PAH de 18 carbonos (C<sub>18</sub>). Las dimensiones de la columna son 25 cm de longitud por 4.6 mm de diámetro y 5µm-de diámetro en la fase estacionaria. El relleno de la columna del HPLC son empaques con un diámetro de 5 µm. La fase móvil consistió de una mezcla de acetonitrilo y agua que se alimenta al equipo a un flujo de 1.5 ml/h, las proporciones de los solventes en la fase móvil varían según el tiempo de la corrida cuyos gradientes se muestran en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1 Gradiente usado para la detección de los HPAs en las muestras de cada monitoreo realizado en el AMM y en Santa Catarina.**

Tiempo (minutos)	Acetonitrilo (% de volumen)	Agua (% de volumen)
0 a 5	60	40
5 a 30	60	40
30 a 40	100	0
40 a 44	100	0

Para poder usar la técnica de HPLC es necesario concentrar la muestra de cada filtro en un volumen de un mililitro. Primero se realiza una extracción de la muestra de los filtros con cloruro de metileno (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, T<sub>eb</sub> = 45 °C) adquirido de Fisher. La extracción se realiza a 12 ciclos por hora durante 15 horas, posteriormente el extracto se concentra evaporando al vacío el exceso de solvente hasta llegar a un mililitro y enseguida la muestra queda lista para ser analizada por HPLC.

### **3.5 Análisis toxicológico de las PM<sub>10</sub> del área metropolitana de Monterrey.**

Al inicio de este capítulo se mencionó que en la última campaña de monitoreo, correspondiente al otoño del 2005, se usó un equipo muestreador de alto volumen para colectar una gran cantidad de partículas suspendidas en el aire del área metropolitana de Monterrey. Específicamente, este equipo se ubicó en las instalaciones de la preparatoria del Tecnológico de Monterrey localizadas en Santa Catarina.

Se dejó al equipo succionando aire durante 24 horas continuas entre los días 2 al 14 de Noviembre del 2006. Se obtuvieron 14 filtros de fibra de vidrio con diferentes cantidades de PM<sub>10</sub> al final del monitoreo de Otoño. Cada vez que se efectuaba un cambio de filtro, el filtro con muestra se empaquetaba en hojas de aluminio plegando el filtro de tal manera que la muestra se quedara en la parte interior de cada dobléz y el filtro se conservaba en un lugar fresco y oscuro.

Los doce filtros con muestra fueron enviados al Instituto de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (U. N. A. M.) en la Ciudad de México en donde fueron sometidos a métodos analíticos como el del cristal violeta y la incubación con glóbulos rojos. Además de estos dos análisis, también se midió la capacidad de degradación de DNA que producen las PM<sub>10</sub> del área metropolitana de Monterrey comparándolas, en los tres distintos análisis, con muestras de PM<sub>10</sub> obtenidas en la atmósfera de la zona metropolitana del Valle de México con filtros de fibra de vidrio.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE PARTICULAS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización física de las partículas medidas en las diferentes campañas y sitios de monitoreo. En la Sección 4.1 se describen los 2 sitios de monitoreo dentro del área metropolitana de Monterrey y los períodos de monitoreo. En la Sección 4.2 se presentan y discuten los datos de concentración de  $PM_{10}$  y de  $PM_{2.5}$  reportados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental en las estaciones de monitoreo del AMM, lo que permite dar un panorama de lo que ocurrió en el AMM durante los muestreos. Los resultados se muestran para cada una de las estaciones del año consideradas en la presente investigación. En las Secciones 4.3 a 4.7 se presentan y discuten los resultados de las distribuciones de tamaño y de los volúmenes representativos de cada tamaño de partícula. Asimismo se analizan las variaciones de concentraciones estacionales y espaciales de los diferentes tamaños.

#### 4.1 Sitios y períodos de monitoreo.

Se escogieron dos sitios de monitoreo para llevar a cabo el estudio. La selección se hizo buscando medir una zona de baja contaminación y otra de alta contaminación en el AMM. El propósito era determinar que diferencias hay en las características de las partículas de una zona a la otra. Según los datos históricos del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), la zona Suroeste (Santa Catarina) es la más contaminada con  $PM_{10}$  y la Zona Sureste (La Pastora) es la menos contaminada.

Se seleccionó como primer sitio de monitoreo las instalaciones de la escuela primaria Alberto Jáuregui en el turno matutino y Serafín García Ávila en el vespertino (es el mismo edificio, solo cambia el nombre por cuestiones administrativas). Lo anterior implica que en la escuela hay actividad desde las 7:00 horas, que es el horario en el cual comienzan a llegar los alumnos del turno matutino, hasta las 18:00 horas pues es en esta hora donde se retira todo el personal del turno vespertino. Este sitio se denominará en adelante como sitio sur del AMM en

este documento. Este sitio se encuentra dentro la colonia Primavera al sur del AMM. Sus instalaciones están rodeadas por una avenida para el tránsito local y el lecho de un arroyo prácticamente seco, donde en ocasiones de lluvia torrencial llega a bajar un caudal importante de agua. Esta última condición no se presentó en ninguna de las 3 épocas del año en que se llevaron a cabo los monitoreos. En el exterior de la escuela el tránsito de la avenida es más alto en los horarios de 7:00 a 8:00, 13:00 a 14:00 y 17:00 a 18:00 horas debido a que corresponden, respectivamente, a la entrada del turno matutino, cambio de turnos y salida del turno vespertino.

El segundo sitio seleccionado fue en las instalaciones de la preparatoria del Instituto Tecnológico de Monterrey Campus Santa Catarina. En este sitio las actividades son continuas desde las 7:00 hasta las 20:00 horas. Las instalaciones de la preparatoria se encuentran en las faldas de un cerro frente a una zona industrial y a una avenida con un flujo de tráfico alto a lo largo del día. La avenida tiene horarios de mayor carga vehicular en las horas pico habituales de la ciudad, es decir, alrededor de las 7:00, las 13:00 y las 17:00 horas. A este sitio se le designará como Santa Catarina en este documento.

Se llevaron a cabo tres periodos de monitoreo, denominados como invierno, primavera-verano y otoño, en las siguientes tres fechas:

1. Del 1 al 20 de Marzo del 2005 (Invierno)
2. Del 3 al 23 de Junio del 2005 (Primavera-Verano)
3. Del 2 al 14 de Noviembre del 2005 (Otoño)

En cada período se midieron concentraciones y se tomaron muestras de  $PM_{2.5}$  así como distribuciones de tamaño de  $PM_{10}$ . Los 2 primeros monitoreos se realizaron para los dos sitios. Lamentablemente en el período 3 solo se tomaron muestras en Santa Catarina ya que no se nos permitió tomar muestras en la Primaria.

La primer época de monitoreo corresponde al invierno del año 2005. La primera etapa de monitoreo se realizó en el sitio sur del AMM, dónde se completaron 8 días efectivos de



monitoreo continuo, del 1 al 9 de Marzo. Durante esos días se tuvo una temperatura promedio de 24°C y humedad relativa promedio fue del 65%. La segunda etapa de este monitoreo se llevó a cabo del 10 al 20 de Marzo del 2005 en el sitio Santa Catarina en donde se tuvo una temperatura promedio de 17°C y una humedad relativa de 47%. En esta fase los registros de los equipos señalan 2 días con bajas temperaturas y altas humedades relativas.

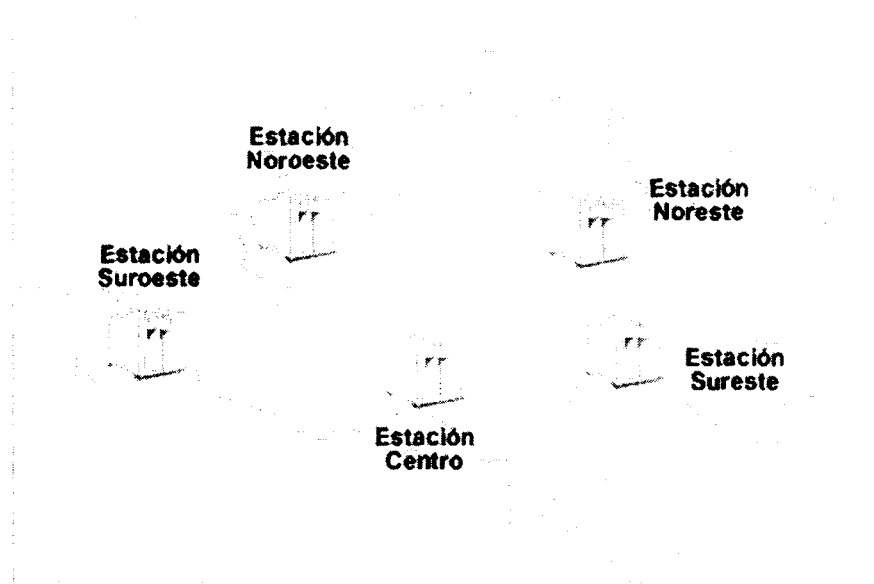
El segundo periodo de monitoreo corresponde a primavera-verano del 2005. La primera etapa de este monitoreo se realizó en el sitio sur del AMM, del 3 al 13 de Junio. Durante esos días las temperaturas registradas fueron en promedio de 29°C, obviamente más altas que las que se tuvieron en el periodo de invierno en el mismo sitio. Respecto a la humedad relativa, fue menor el valor promedio registrado en el periodo primavera-verano que el de invierno. En esta época se tiene un valor de 47% aproximadamente. La segunda etapa se realizó en el sitio Santa Catarina del 14 de Junio al 2 de Julio. Al igual que en el sitio sur del AMM, en el sitio Santa Catarina también se registró un valor mayor de la temperatura promediándose un valor de 29°C respecto a los 17°C registrados en invierno. Por otro lado la humedad relativa disminuyó fue menor alcanzando un valor promedio de 35%.

El último periodo de monitoreo se realizó en el otoño, del 3 al 14 de Noviembre y solo pudo llevarse a cabo en el sitio Santa Catarina. En el sitio sur no se contó con la autorización de la directora de la Escuela Alberto Jáuregui del turno matutino para instalar los equipos. Por cuestiones de logística ya no se pudo reprogramar otro sitio de monitoreo para la zona Sur. Además, el monitor de concentración de PM<sub>2,5</sub> presentó fallas en una fuente de energía por lo que no se utilizó.

Este periodo se caracteriza porque las temperaturas registradas en el sitio Santa Catarina estuvieron intermedias entre los dos períodos anteriores. En promedio se tuvo un valor de 22°C y una humedad de 55% en promedio.

#### 4.2 Datos de concentración de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ reportados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA).

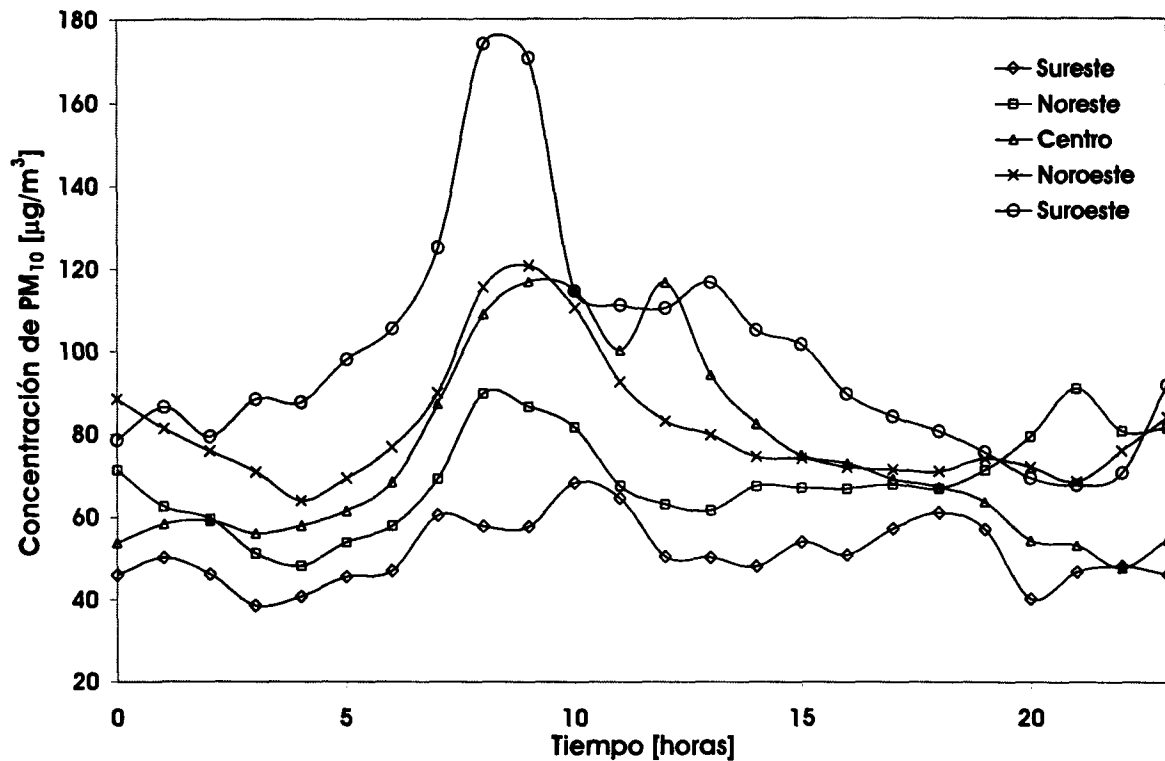
El comportamiento de las concentraciones de partículas en el AMM durante los períodos de monitoreo se obtuvo de los datos reportados por el SIMA y que son obtenidos de sus cinco estaciones que funcionan en el AMM (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Estaciones de monitoreo ambiental del SIMA en el AMM.

Las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran los valores promedio por hora de la concentración de  $PM_{10}$  en el AMM para cada uno de los períodos de invierno, primavera-verano y otoño, respectivamente, en que se realizaron los monitoreos de este trabajo.

La Figura 4.2 muestra que durante el periodo de invierno la estación de monitoreo Santa Catarina del SIMA localizada en el suroeste del AMM registró casi todas las horas los valores de concentración más altos en toda el AMM, entre  $80$  y  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores obtenidos de la estación La Pastora localizada en el sureste del AMM, son los más bajos de las cinco estaciones, entre  $40$  y  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

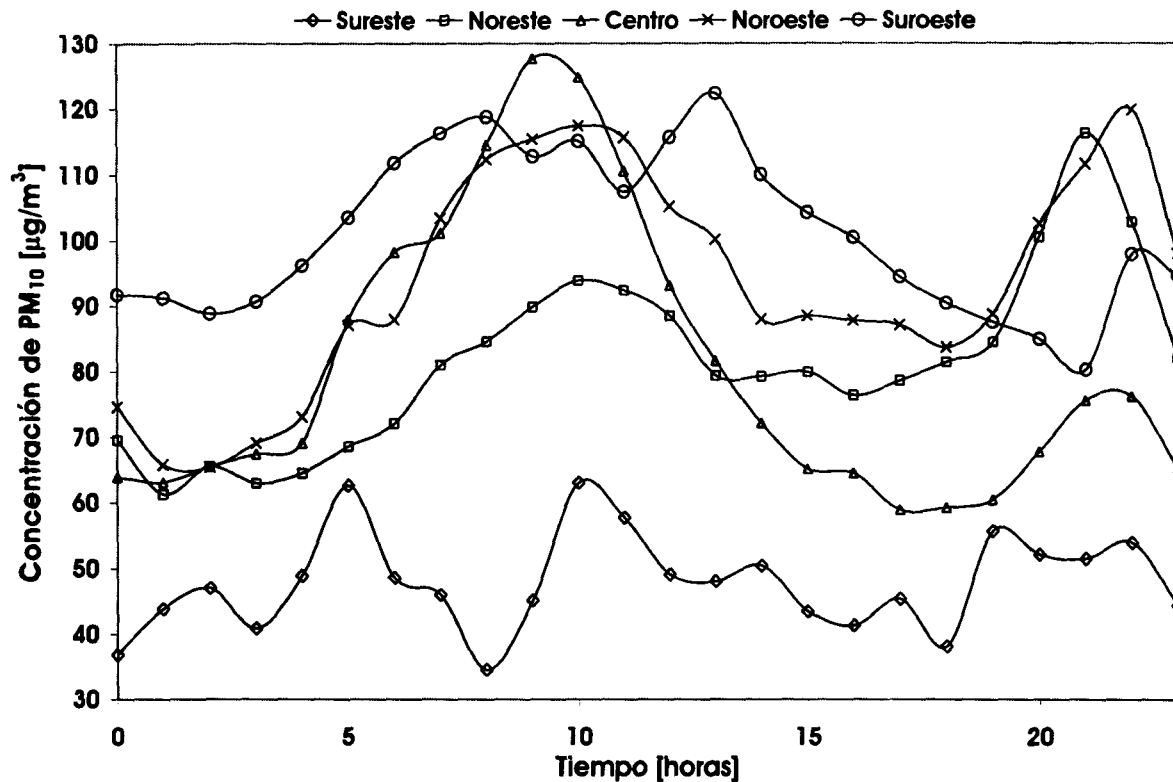


**Figura 4.2** Valores promedio de concentración para PM<sub>10</sub> durante el periodo de invierno en el AMM (1 al 20 de Marzo, 2005).

En la misma figura se observa un pico que ocurre casi simultáneamente en todas las zonas, entre las 8:00 y las 9:00 horas, y que tiene una concentración mayor en la estación de Santa Catarina en la zona suroeste. Esta concentración de casi 180 µg/m<sup>3</sup> supera al estándar diario de concentración de PM<sub>10</sub> que se fija en 150 µg/m<sup>3</sup> además de que es más de 3 veces mayor comparado con el estándar medio anual de 50 µg/m<sup>3</sup>. Comparando cualquiera de las concentraciones en las distintas zonas en cualquier hora del día, se puede concluir que estos valores son superiores al estándar anual de PM<sub>10</sub> en todas las zonas, exceptuando la estación sureste aunque esta última registra valores en algunas horas del día donde supera el estándar de concentración de PM<sub>10</sub>.

En la Figura 4.3 se observa nuevamente que en promedio la zona suroeste y sureste son las de mayor y menor concentración de PM<sub>10</sub> respectivamente. En la zona suroeste alcanzó valores entre 80 y 120 µg/m<sup>3</sup>. Solamente entre las 9:00 y las 10:00 horas y entre las 20 y 24

horas las zonas centro (Obispado) y noroeste (San Bernabé) registran valores promedio de concentración mayores a los que se tuvieron en Santa Catarina durante esas horas. La zona sureste registro valores entre 35 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo anterior indica que todas las zonas presentaron violaciones diarias al valor norma de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  incluyendo a la zona sureste que en algunas horas del día el valor de concentración diario de  $\text{PM}_{10}$  fue superior al valor de la norma, este mismo valor fue superado en más del doble en las zonas suroeste, centro y noroeste durante casi todo el día.

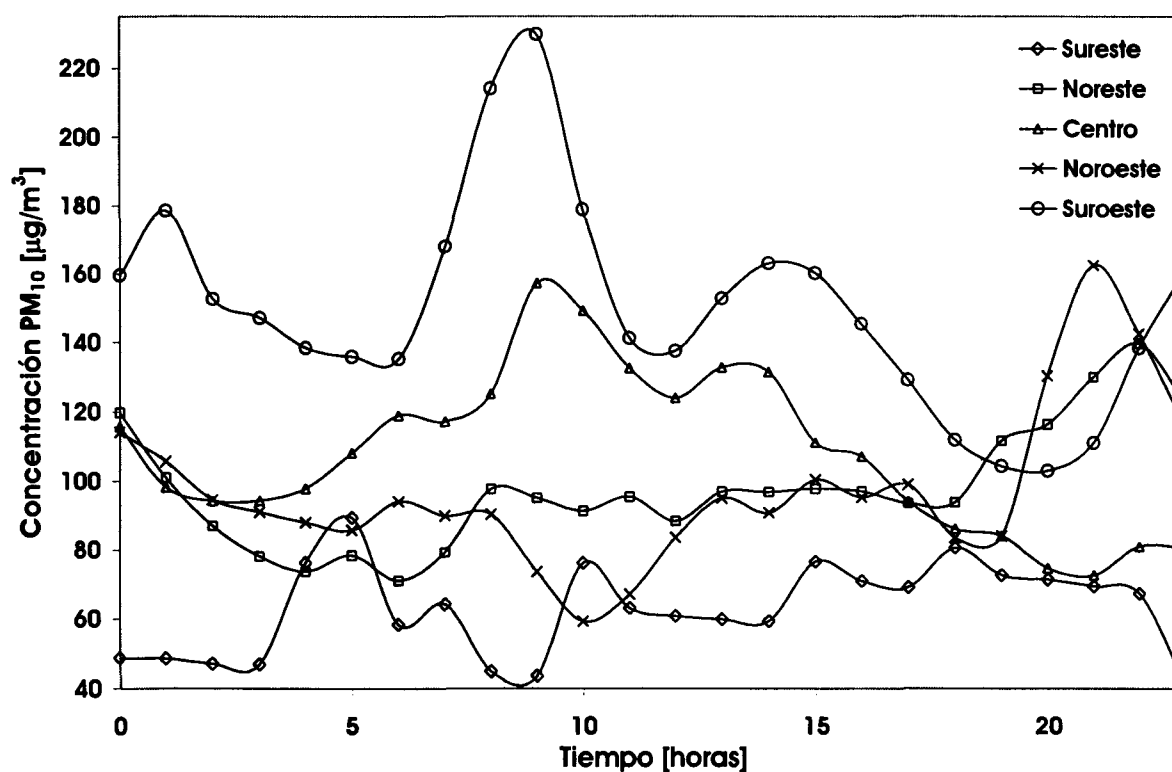


**Figura 4.3** Valores promedio de concentración para  $\text{PM}_{10}$  durante el periodo de primavera-verano en el AMM (3 de Junio al 2 de Julio, 2005).

En la Figura 4.3 se pueden observar 3 picos que corresponden a las zonas suroeste, centro y noroeste entre las 8:00 y las 13:00 horas en los cuales el valor de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  es casi el triple de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 4.2 se observó un pico con un valor de concentración de  $\text{PM}_{10}$  en la zona suroeste parecido al que se observa en la Figura 4.3 pero en la zona centro a la misma hora, pero el valor de concentración de este pico en primavera es mayor en 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comparado con el valor de primavera-verano. Con respecto a los valores

de todas las zonas, las concentraciones de  $PM_{10}$  son parecidas en ambos periodos de monitoreo.

Para el período del otoño, los perfiles de concentración de  $PM_{10}$  se muestran en la Figura 4.4. Las tendencias de estas curvas son muy parecidas a las de las dos figuras anteriores. La zona suroeste resulta ser la de mayor concentración de  $PM_{10}$  alcanzando valores entre 110 hasta un pico de  $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el cual resulta 4 veces mayor al valor diario de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la norma que también es superado en la misma zona a las 23:00 horas con un valor de concentración de  $PM_{10}$  de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Una violación también grave a este valor se da en la zona noroeste a las 21 horas en donde existe un valor de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por otro lado la más baja es la zona sureste con valores entre 40 y  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Solamente a las 5:00 Hrs. las zonas noroeste y noreste muestran una concentración promedio más baja que la de la zona sureste. Similarmente, a las 10:00 Hrs. la estación noroeste registra un valor menor que la estación sureste.



**Figura 4.4** Valores promedios de concentración para  $PM_{10}$  durante el periodo de otoño en el AMM (3 al 14 de Noviembre, 2005).

Las Figuras 4.2 a la 4.4 muestran que durante el otoño las concentraciones de PM<sub>10</sub> suben en todas las zonas del AMM. Zonas como el Noroeste o Centro tienen concentraciones muy cercanas a las de Santa Catarina, inclusive llegan a superarla en algunas horas del día. La Pastora es la zona que mantiene las concentraciones más bajas en cualquiera de los 3 periodos. También se muestra que en Santa Catarina coincide un pico de concentración de PM<sub>10</sub> a las 10:00 horas tanto en invierno como en otoño. En otoño la concentración de PM<sub>10</sub> aumenta en todas las zonas del AMM es otoño, Santa Catarina siempre muestra en promedio mayores concentraciones que cualquiera de las otras zonas.

Las Tablas 4.1 a 4.3 muestran los valores promedio de concentración de PM<sub>10</sub> reportados por el SIMA en las zonas del AMM durante el invierno del 2004 y el periodo de primavera-verano y otoño del 2005, en estas tablas se incluyen también los valores máximos y mínimos de las concentraciones para cada una de las zonas.

**Tabla 4.1** Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM<sub>10</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de invierno del 2004 en el AMM.

Valor de PM <sub>10</sub> en la época de Invierno [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	51.40	38.57	68.22
Noreste	69.30	48.27	90.85
Centro	74.76	47.83	116.87
Noroeste	81.47	63.98	120.72
Suroeste	99.23	67.62	173.92

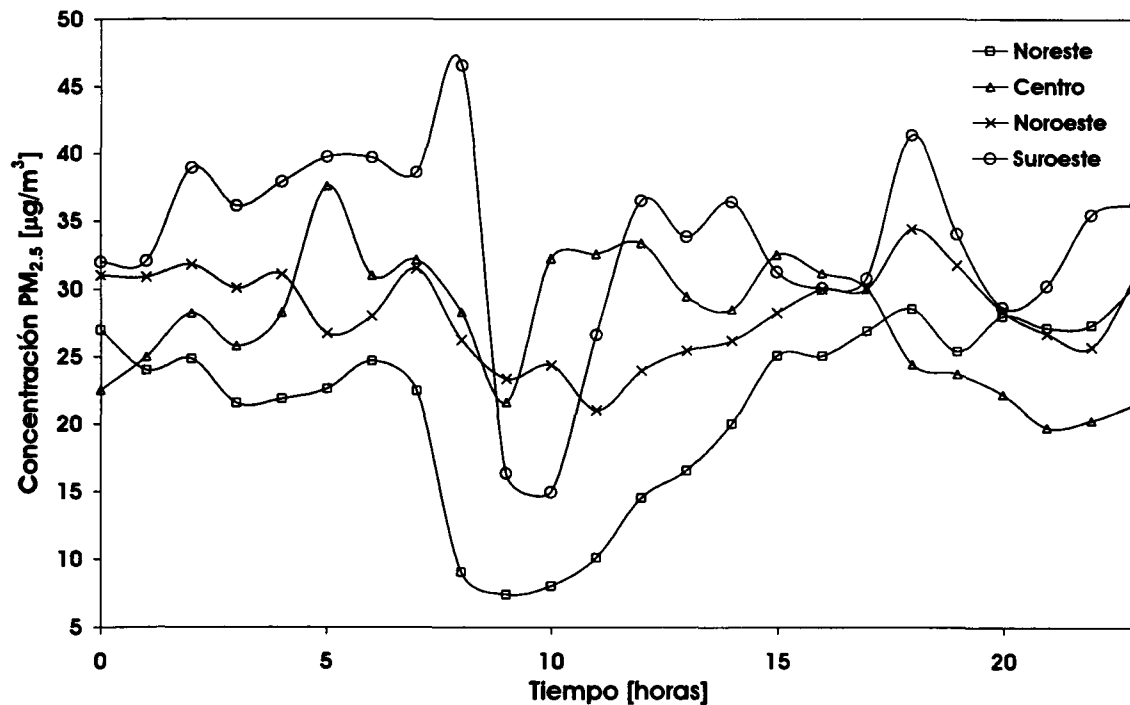
**Tabla 4.2** Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM<sub>10</sub> reportados por el SIMA en el monitoreo de primavera-verano del 2005 en el AMM.

Valor de PM <sub>10</sub> en la época de primavera-verano [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	47.87	34.54	63.00
Noreste	81.51	61.27	116.37
Centro	80.59	58.93	127.67
Noroeste	93.70	65.37	119.87
Suroeste	101.16	80.33	122.3

**Tabla 4.3** Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de  $PM_{10}$  reportados por el SIMA durante el monitoreo de otoño del 2005 en el AMM.

Valor de $PM_{10}$ en la época de Otoño [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	62.81	41.00	80.75
Noreste	98.13	71.08	139.75
Centro	107.94	72.83	157.33
Noroeste	97.42	59.25	162.58
Suroeste	149.93	103.17	229.83

Similarmente a los perfiles de concentración de  $PM_{10}$  los perfiles de concentración de  $PM_{2.5}$  se muestran en las Figuras 4.5 a la 4.7.

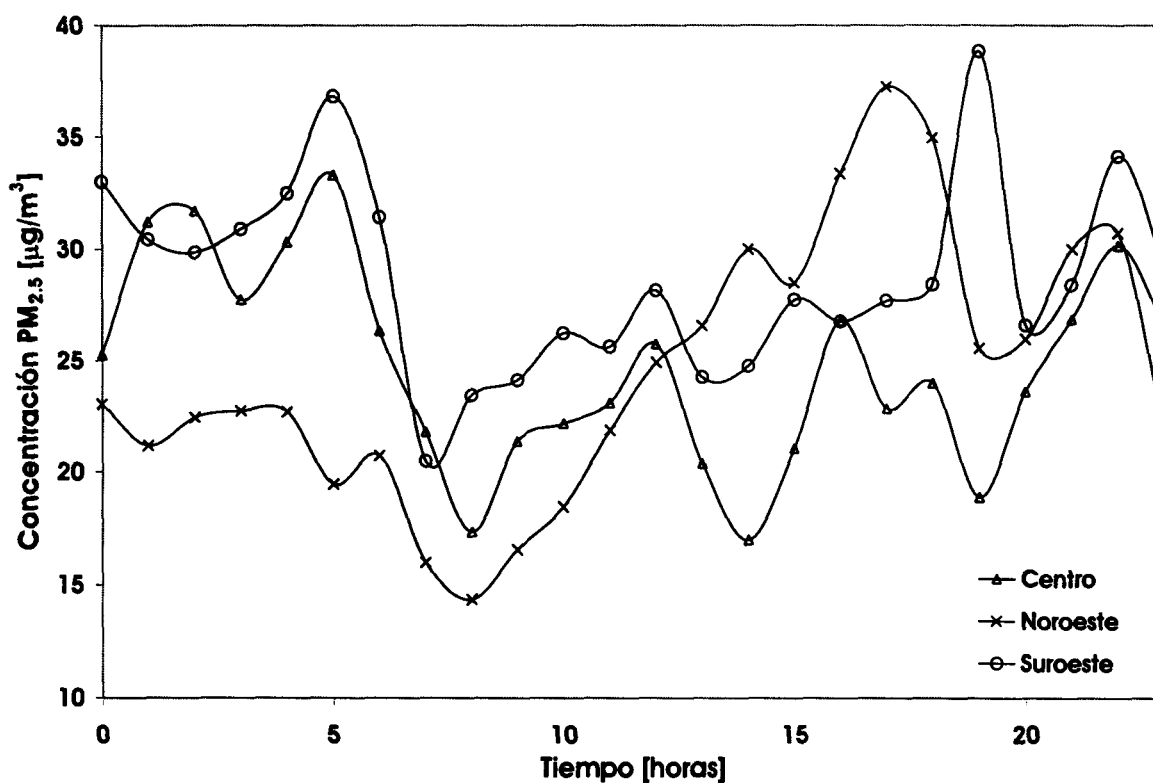


**Figura 4.5** Valores promedio de concentración para  $PM_{2.5}$  durante el periodo de invierno en el AMM (1 al 20 de Marzo, 2005).

En la estación ubicada en la Pastora no se registraron datos de concentración de  $PM_{2.5}$  para el periodo de invierno mostrado en la Figura 4.5, que muestra que hasta las 8:00 horas Santa Catarina alcanza las mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$  con un valor de  $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pero

la zona centro aumenta sus valores de concentración alcanzando registros más altos, entre 22 y 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , que los de Santa Catarina entre las 9:00 y las 11:00 horas. El Noreste es la zona que registra las concentraciones más bajas a lo largo del día durante el invierno, pero a partir de las 9:00 Hrs. comienza a aumentar la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en la zona aunque es hasta las 18:00 Hrs. cuando sobrepasa a la del Centro continuando con el aumento de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en las horas restantes.

La Figura 4.5 muestra que las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  en el AMM no superan el estándar de exposición diario de 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pero si al estándar anual de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en algunas zonas las concentraciones llegan a ser de más del doble y solo en el caso de Santa Catarina el pico de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  triplica el valor del estándar anual.



**Figura 4.6** Valores promedios de concentración para  $\text{PM}_{2.5}$  durante el periodo primavera-verano en el AMM (3 de Junio al 2 de Julio, 2005).

No se tienen datos reportados de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  para las estaciones de la Pastora (sureste) y de San Nicolás (noreste) durante el periodo que se muestra en la Figura 4.6.



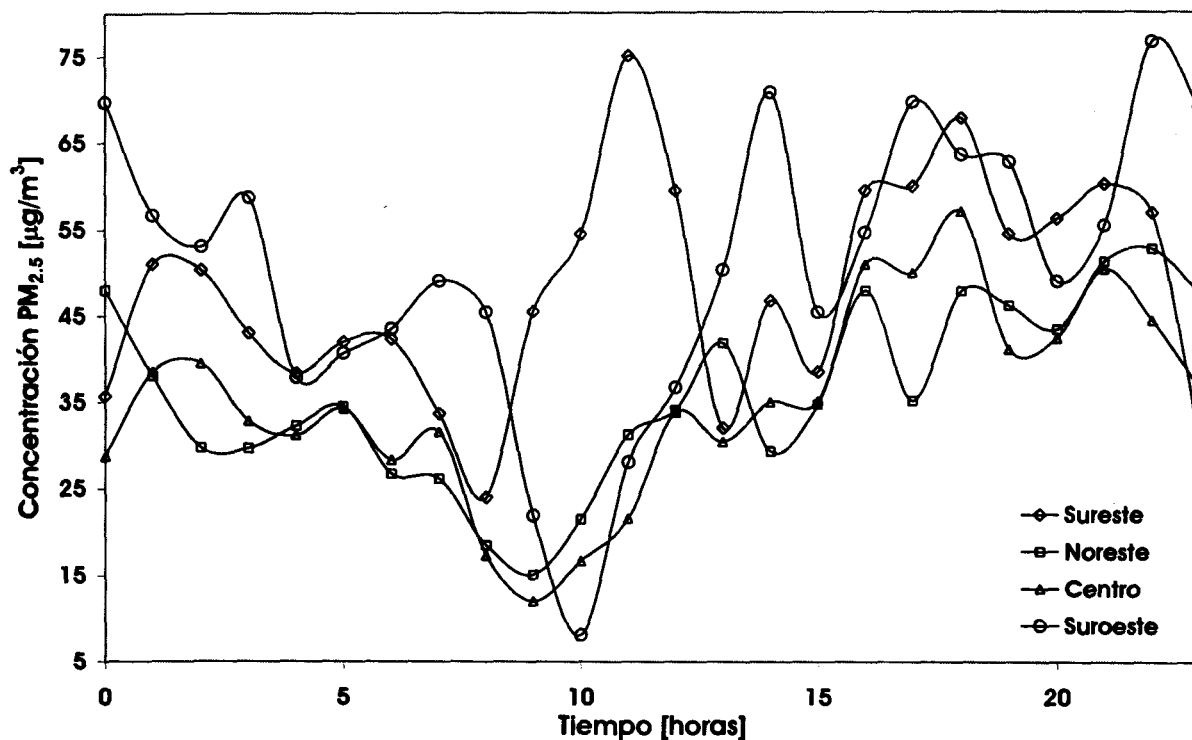
Similarmente a la Figura 4.5, los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  no indican que alguna de las estaciones predomine sobre las demás todo el día. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  son altas en las primeras horas del día excepto en la zona Noroeste en donde la concentración es baja comparada con las otras 2 zonas. A partir de las 8:00 Hrs. se da un aumento en la concentración de las 3 zonas alcanzando picos de concentración de  $PM_{2.5}$  entre las 17:00 y las 19:00 Hrs. la concentración vuelve a bajar a las 20:00 y continua aumentando en el tiempo restante.

Otra similitud entre las Figuras 4.5 y 4.6 es que en ambas no se supera el estándar de concentración diario de  $PM_{2.5}$ . Por el contrario, el valor estándar anual de concentración de  $PM_{2.5}$  es superado en todas las zonas según los registros de las estaciones de monitoreo. Esto implica que la población del AMM se encuentra expuesta a concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden influir en el buen estado de su salud durante la época de verano, siendo los niños son el sector de la población más sensible a los efectos nocivos de estas partículas.

El perfil de concentración que muestra la Figura 4.6 es parecido al de la Figura 4.7 pues en las dos se observan concentraciones altas de  $PM_{2.5}$  en la mayor parte del día y muestran puntos mínimos de concentración entre las 7:00 y las 10:00 horas. Tampoco hay una diferencia notable entre los máximos y mínimos de concentración de  $PM_{2.5}$ , independientemente de la zona que se refiera, en las 2 épocas en cada una de las figuras.

El perfil de concentraciones de  $PM_{2.5}$  mostrado en la Figura 4.7 es distinto de los de las Figuras 4.5 y 4.6. No se muestra la gráfica correspondiente a la zona noroeste debido a que la estación de la zona no registró datos de concentración de  $PM_{2.5}$ . Durante la época de otoño la concentración de partículas es alta al comienzo del día en todas las zonas y en algunas se observa un aumento al inicio del día (sureste y centro), en las zonas sureste y noreste desde el inicio del día la tendencia de la concentración de  $PM_{2.5}$  es a la baja. Las 4 zonas que se muestran alcanzan valores mínimos de concentración, de 8 a  $15 \mu g/m^3$ , entre las 9:00 y las 10:00 horas, excepto el sureste cuyo mínimo se da a las 8:00 horas ( $24 \mu g/m^3$ ) de este punto en adelante las concentraciones de  $PM_{2.5}$  comienzan a aumentar y alcanzan varios picos en lo que

resta del día con valores de concentración entre 52 y 77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este comportamiento muestra lo inestable que pueden ser las  $\text{PM}_{2.5}$ .



**Figura 4.7** Valores promedio de concentración para  $\text{PM}_{2.5}$  durante el periodo de otoño en el AMM (2 al 14 de Noviembre, 2005).

Las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  en la Figura 4.7 llegan a superar en varias ocasiones al estándar de exposición diaria ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a pesar de que entre las 7:00 y las 10:00 horas hay registros menores al estándar. También se duplica y triplica el estándar de concentración anual en todas las zonas del AMM. Esto significa que durante el otoño la población del AMM se encuentra expuesta a la contaminación por  $\text{PM}_{2.5}$  tanto en forma aguda como crónica, lo que debe ser un factor a considerar en el deterioro de la salud de la población en general.

Las Figuras 4.5 a 4.7 muestran que la zona de Santa Catarina tiene la mayor concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , al igual que sucedió con las  $\text{PM}_{10}$ . Excepto por algunas horas en la Figura 4.7, no se tienen datos para la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en la zona sureste del AMM y en

algunas horas son tan altos como los de la zona suroeste. A la fecha no se cuenta con una caracterización química de las partículas que permita conocer las especies que forman el PM<sub>10</sub>.

Con esta información podría evaluarse el daño en la salud que tiene esta fracción de la materia particulada en el AMM, así como determinar las fuentes potenciales de estas partículas.

El resumen de las concentraciones mínima, promedio y máxima de PM<sub>2.5</sub>, a partir de los datos reportados por el SIMA, se muestra en las Tablas 4.5 a 4.7. Los valores de las tablas indican que en promedio todas las zonas del AMM tienen valores de concentración de PM<sub>2.5</sub> por encima del estándar de exposición anual y en algunas épocas del año hay estaciones de monitoreo donde incluso el mínimo de concentración medida supera al estándar anual de 15 µg/m<sup>3</sup>. Con respecto al estándar de exposición diaria, el valor de 65 µg/m<sup>3</sup> establecido por la norma solo es superado en las 2 estaciones del sur del AMM como muestra la Tabla 4.7 que se refiere a las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> registradas por las estaciones del SIMA en la época de otoño con 75 µg/m<sup>3</sup> en la estación de la Pastora y 77 µg/m<sup>3</sup> en la estación de Santa Catarina.

**Tabla 4.4 Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM<sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de invierno del 2004 en el AMM.**

Valor de PM <sub>10</sub> en la época de Invierno [µg/m <sup>3</sup> ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	ND	ND	ND
Noreste	21.61	7.39	30.33
Centro	27.59	19.76	37.59
Noroeste	28.24	21.02	31.79
Suroeste	33.51	14.94	46.56

**Tabla 4.5 Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM<sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de primavera-verano del 2005 en el AMM.**

Valor de PM <sub>10</sub> en la época de primavera-verano [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	ND	ND	ND
Noreste	ND	ND	ND
Centro	24.82	17.00	33.30
Noroeste	24.56	14.37	37.23
Suroeste	28.75	20.50	38.83

**Tabla 4.6 Valores promedio, mínimo y máximo de concentración de PM<sub>2.5</sub> reportados por el SIMA durante el monitoreo de otoño del 2005 en el AMM.**

Valor de PM <sub>10</sub> en la época de Otoño [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
Zona del AMM	Promedio	Mínimo	Máximo
Sureste	48.26	24.00	75.00
Noreste	35.99	15.08	52.83
Centro	35.00	12.00	57.08
Noroeste	ND	ND	ND
Suroeste	50.69	8.08	76.58

#### **4.3 Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en el periodo de invierno del 2004 en el sur del AMM.**

En esta sección se discuten los resultados obtenidos del análisis de los datos de distribución de tamaño de PM<sub>10</sub> en el monitoreo de invierno en Santa Catarina y en el sitio sur del AMM los cuales se han descrito ya en la Sección 4.1. Primeramente se presentan y discuten los perfiles normalizados, o fracciones, de tamaño y volumen de las partículas para los intervalos 0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.5, 2.5-5.0 y 5.0 a 10.0  $\mu\text{m}$ . Se muestra las relaciones de tamaño y volumen normalizados de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Por último, se discuten las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> medidas en la escuela primaria.

Las distribuciones de tamaño registradas por el equipo Climet se encuentran en el Apéndice A.

#### **4.3.1 Distribución de tamaño de $PM_{10}$ .**

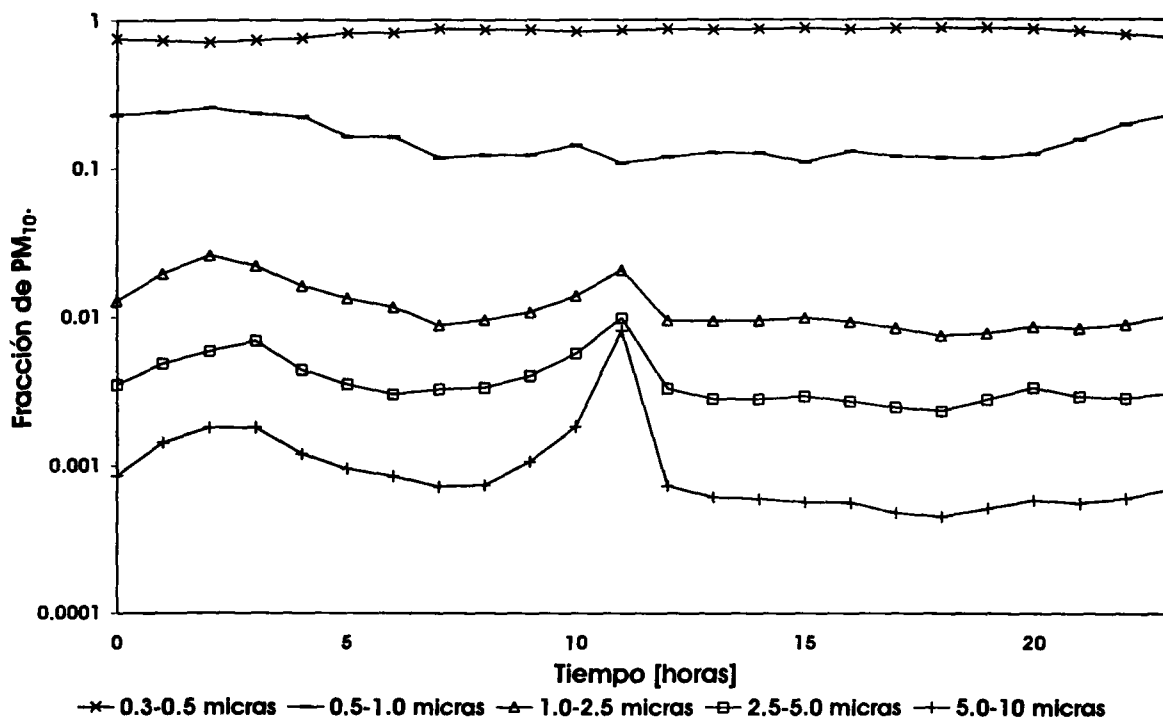
Como es característico de los aerosoles atmosféricos, se encontró que las partículas más pequeñas se encuentran en gran cantidad comparadas con las de mayor diámetro, por lo anterior se usaron escalas logarítmicas. La Figura 4.7 muestra las fracciones de tamaño de partícula en el sitio sur para el período del 3 al 9 de Marzo.

El monitoreo se inició el 3 de Marzo a las 13:05. El equipo CLIMET CI-500 se programó para que contara las partículas de una muestra tomada durante un minuto cada 15 minutos. El equipo trabaja a un flujo constante de  $1 \text{ ft}^3$  por minuto. Cada punto de las Figuras 4.8 y 4.9 es el promedio de 4 valores tomados en cada hora. La fracción es igual a la cantidad promedio de partículas de cada intervalo de tamaño dividido por la suma de la cantidad total de partículas promedio en todos los intervalos en el mismo volumen de muestra de  $4 \text{ ft}^3$  en 1 hora, como se muestra en la Ecuación (2) de la Sección 3.3. El último punto se tomó a las 13:35 horas del día 9 de Marzo del 2005.

La Figura 4.8 muestra la fracción de partículas en los cinco intervalos de tamaño de partículas que el CI-500 registra. Los intervalos de  $0.3$  a  $0.5 \mu\text{m}$  y  $0.5$  a  $1.0 \mu\text{m}$  representan en conjunto alrededor del 97% del número de partículas. Se observa también que las partículas con un tamaño mayor a  $1.0 \mu\text{m}$  registran 2 máximos en sus fracciones en el día. El primer pico aparece a las 3:00 horas para las partículas entre  $0.3$  y  $0.5 \mu\text{m}$  y las del intervalo de  $1.0$  a  $2.5 \mu\text{m}$ , mientras que las partículas del intervalo de  $0.5$  a  $1.0 \mu\text{m}$  muestran su primer máximo a las 4:00 horas. El segundo máximo del día aparece simultáneamente a las 11:00 horas para los 3 intervalos de partículas más pequeños.

La Figura 4.8 muestra que de  $0.3$  a  $0.5 \mu\text{m}$  las partículas se encuentran en mayor cantidad que en los intervalos mayores subsecuentes; es decir, entre menor es el diámetro de las partículas mayor es su cantidad en la muestra. Las variaciones pueden deberse

a cambios diurnos en las emisiones de partículas o sus precursores y a su dinámica en la atmósfera.

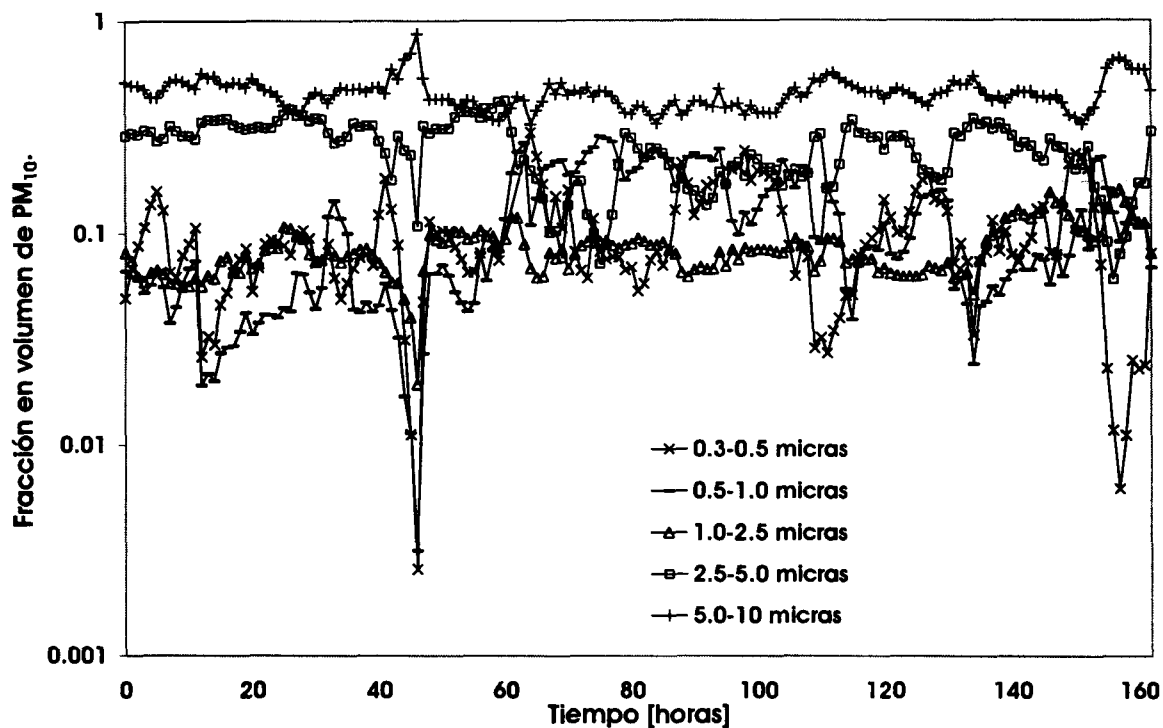


**Figura 4.8** Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.

#### 4.3.2 Distribución de volumen de $PM_{10}$ .

De los datos de fracciones en cantidad de partículas, usando la Ecuación (1) mostrada en la Sección 3.3 se obtuvieron las fracciones en volumen de las partículas. Gráficas de estas fracciones por intervalos de tamaño se muestran en las Figura 4.9. Estas figuras se obtuvieron de la Figura 4.8 suponiendo partículas esféricas como se comentó en la sección 3.3. Contrario a lo que sucede con el número de partículas, la fracción en volumen más grande corresponde a las partículas de mayor diámetro, y las de menor tamaño ( $PM_{1.0}$ ) representan la menor cantidad en volumen. En la Figura 4.8 se observa que conforme el diámetro de la partícula va en aumento el volumen que representa a un intervalo en específico también aumenta rápidamente. Esto implica que aunque las partículas pequeñas están en mayor cantidad su

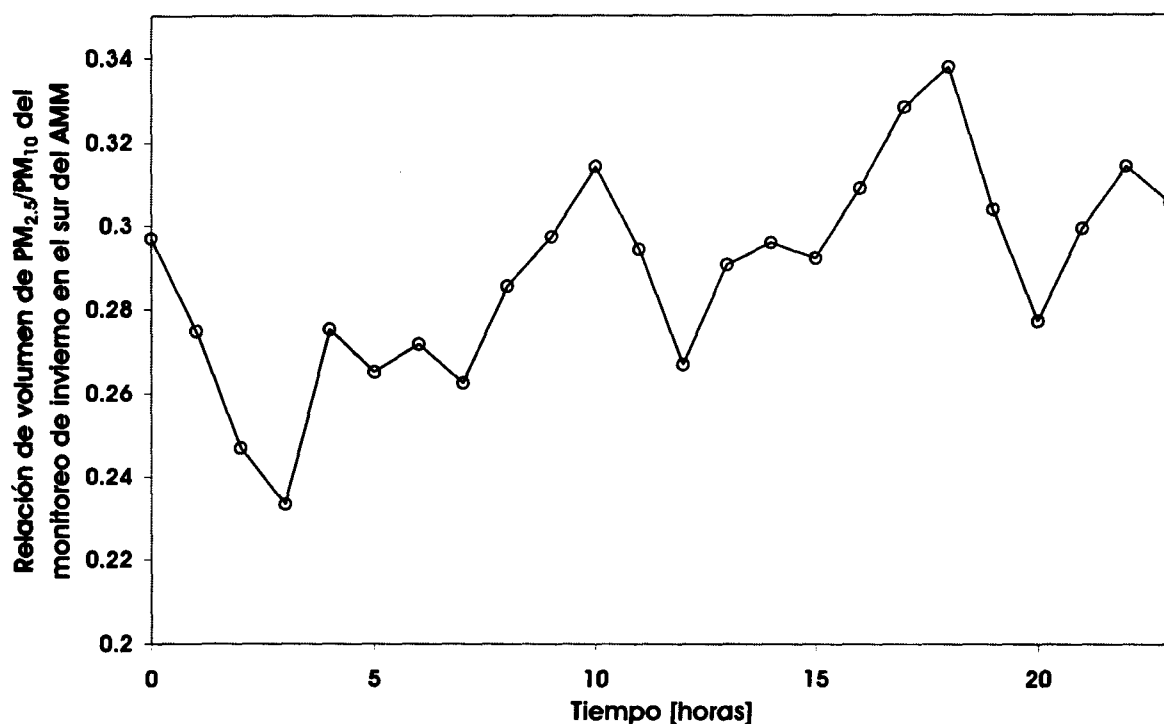
contribución al volumen global de la muestra es mínima en comparación con aquellas mayores a  $1.0 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.9** Fracción de volumen de partículas del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.

De la Figura 4.10 se obtiene la relación de volumen promedio por hora de  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ , la cual se muestra en la Figura 4.10. En esta figura se observa que la fracción de  $\text{PM}_{2.5}$  se encuentra entre el 23 y el 34% respecto del total de  $\text{PM}_{10}$ . También se observa en esta figura que a partir de las 4:00 horas existe una tendencia al aumento en la fracción de  $\text{PM}_{2.5}$  con variaciones a lo largo del día para disminuir por la noche.

El perfil de volumen para los tamaños de muestra de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  a lo largo del día se muestra en la Figura 4.10. El volumen de  $\text{PM}_{10}$  comienza a aumentar a partir de las 19:00 horas alcanzando el valor máximo hasta las 2:00 horas, después el volumen disminuye hasta un valor mínimo hasta las 11:00 horas y a partir de entonces se da un ligero aumento en el volumen hasta un valor que tiene una estabilidad relativa hasta las 19:00 horas. Estos volúmenes dan una idea de las variaciones de las cantidades de  $\text{PM}_{10}$  durante el día.



**Figura 4.10** Relación de PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> en el monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.

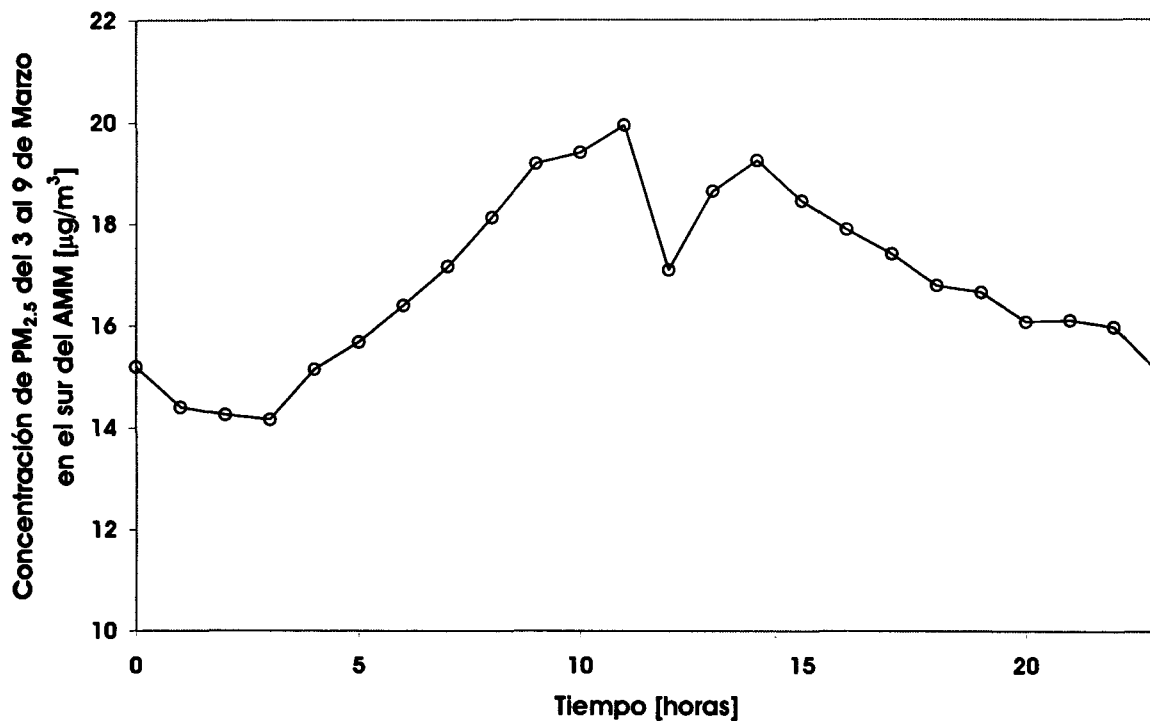
### 4.3.3 Concentración de PM<sub>2.5</sub>.

Simultáneamente con el conteo de tamaños de partículas se llevó a cabo la medición de concentración de PM<sub>2.5</sub> en el sitio sur. Para esto se usó el equipo Data RAM DR-4000 que se programó para tomar medidas en tiempo real registrando en la memoria el valor de la concentración promedio cada 5 minutos, además de tomar otros parámetros como temperatura, humedad relativa, el diámetro promedio de la muestra de partículas, la fecha y la hora en que se midió la concentración de PM<sub>2.5</sub> como se describió en la Sección 3.2. El perfil de concentración promedio por hora del día para el PM<sub>2.5</sub> en el sitio sur durante los días 3 al 9 de Marzo del 2005 se muestra en la Figura 4.11.

En esta figura se observa que existe una ligera disminución en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> durante las primeras horas del día bajando de 15 a 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . A partir de las 4:00 horas la concentración empieza a elevarse hasta alcanzar una concentración máxima a las 11:00



horas de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente. A partir de esta hora la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  permanece en valores cercanos a  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta las 15:00 horas en donde comienza a haber una disminución en las horas restantes del día hasta alcanzar  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente.

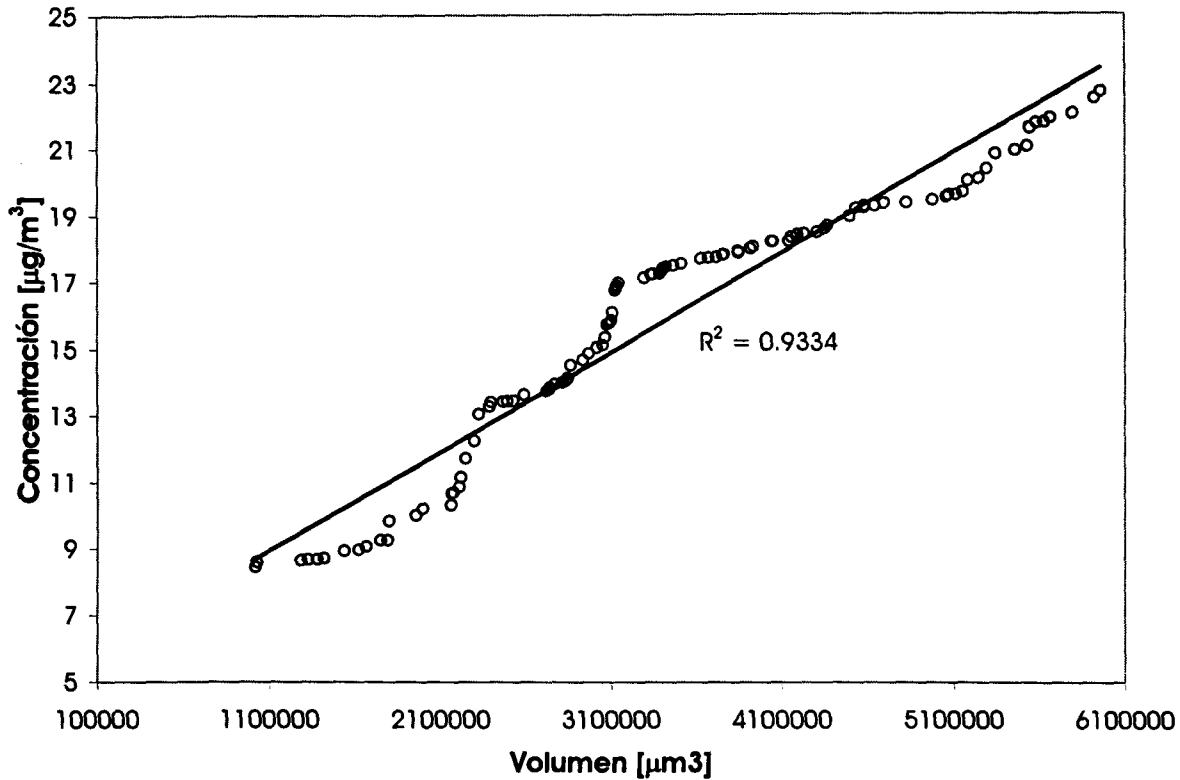


**Figura 4.11 Perfil diario de concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.**

La media de la concentración de este periodo de monitoreo en el sur del AMM fue de  $16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una desviación estándar de  $4.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para evaluar la consistencia de los datos medidos con el contador de partículas y con el monitor de concentraciones se hizo una correlación de los datos de concentración y volumen de  $\text{PM}_{2.5}$  suponiendo partículas esféricas que se muestra en la Figura 4.12.

La correlación obtenida para el sitio sur durante el periodo de monitoreo de invierno. El valor de correlación obtenido es de 0.9334, que es bastante bueno, indicando una gran consistencia entre las mediciones que hay entre uno y otro equipo.



**Figura 4.12** Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500 del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 3 al 9 de Marzo del 2005.

#### **4.4 Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en el periodo de invierno en Santa Catarina.**

El monitoreo correspondiente al periodo de invierno (11 al 21 de Marzo) se realizó también en las instalaciones de la Preparatoria del Tecnológico de Monterrey ubicadas en Santa Catarina, que es como se referirá a este sitio de monitoreo en lo subsiguiente del capítulo. Durante este periodo hubo días fríos con mucha humedad que tuvieron influencia sobre la cantidad de partículas contabilizadas y en los valores de concentración medidos. El periodo de monitoreo en el sitio inició el día 11 de Marzo a las 11 de la mañana y concluyó el 21 de Marzo a las 11:00 AM.

#### 4.4.1 Distribución de tamaño de PM<sub>10</sub>.

La Figura 4.13 muestra que las partículas más finas se encuentran en mayor cantidad, similarmente a la Figura 4.8, esta fracción representa más del 95% de la muestra total. Las partículas mayores de 1.0  $\mu\text{m}$  muestran un pico a las 8:00 horas sin que se vea otro aumento en la cantidad de partículas durante el resto del día. En el caso de las partículas entre 0.5 y 1.0  $\mu\text{m}$  se observan 3 máximos a las 3:00, 7:00 a 8:00 y a las 10:00 horas. Después de las 10:00 horas la cantidad de las partículas entre 0.5  $\mu\text{m}$  y 1.0  $\mu\text{m}$  disminuye a lo largo del día.

Se observa que las cantidades de partículas variaron relativamente poco durante el tiempo que duró el monitoreo y estas variaciones son más notables conforme aumenta el tamaño del intervalo.

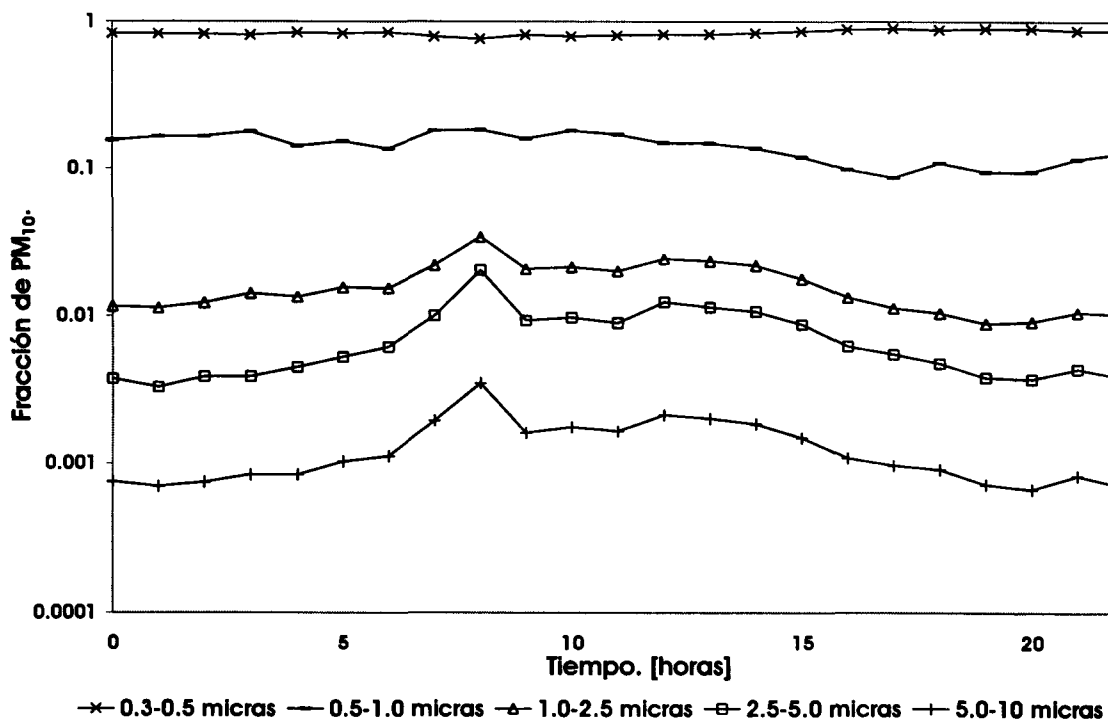


Figura 4.13 Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.

#### 4.4.2 Distribución de volumen de PM<sub>10</sub>.

En lo que respecta a perfiles de distribución del volumen la Figura 4.14 muestra, al igual que la Figura 4.9, que la fracción gruesa ocupa la parte más representativa del volumen global de la muestra. En el caso de la Prepa Tec (Figura 4.14) la diferencia entre los valores de las partículas mayores a 2.5  $\mu\text{m}$  y las menores a ese número es más marcado. Es decir, en la zona de Santa Catarina predomina fuertemente la fracción gruesa de las partículas, mientras que en el sur de Monterrey la diferencia es notable pero no tan marcada.

No hay un patrón claro en el comportamiento de las partículas en cada intervalo de tamaño de diámetro. Tomando en cuenta los valores tan altos de los volúmenes de las partículas es posible decir que no existen variaciones muy marcadas en todos los intervalos excepto con las partículas más finas en las cuales los valores llegan a diferir más que en el caso de las partículas con diámetros mayores a 1.0  $\mu\text{m}$ .

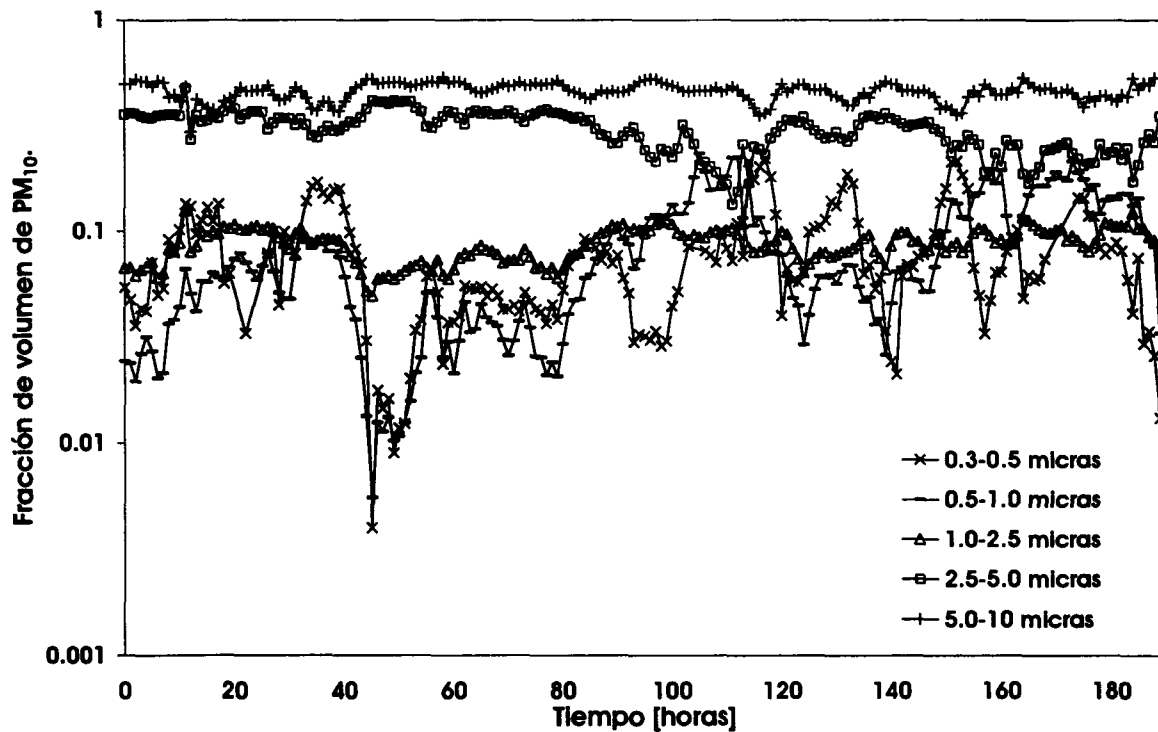
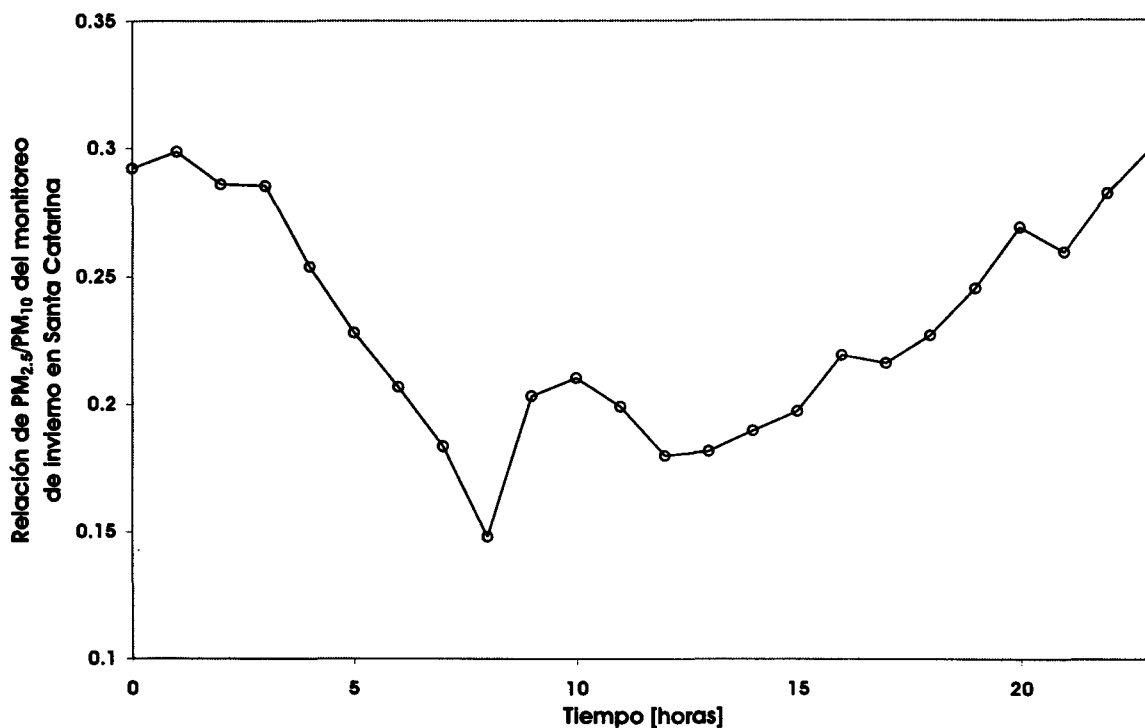


Figura 4.14 Fracción de volumen de partículas del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.

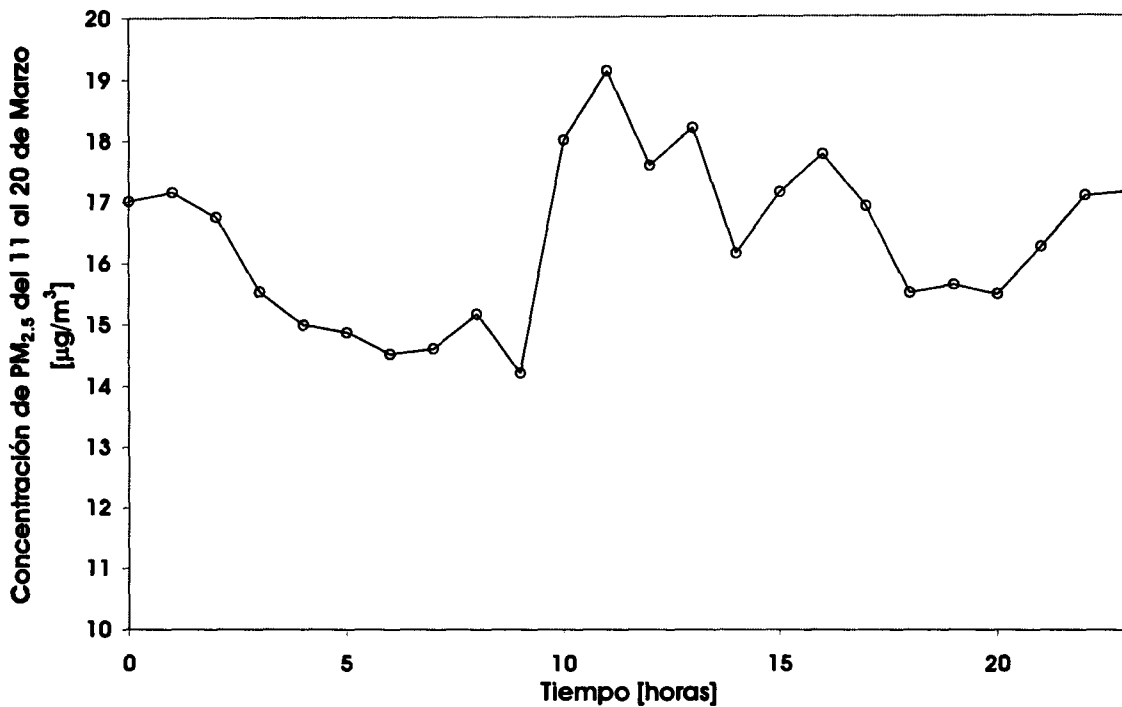
En la Figura 4.15 se muestra la razón de volumen  $PM_{2.5}/PM_{10}$ . En la figura se observan 2 picos de concentración a la 1:00 y a las 23:00 Hrs. por lo que la cercanía entre ambos puntos permite pensar que de las 23:00 a las 1:00 Hrs. el aumento en el volumen de  $PM_{2.5}$  adquiere estabilidad.



**Figura 4.15** Relación de  $PM_{2.5}/PM_{10}$  del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.

#### 4.4.3 Concentración de $PM_{2.5}$ .

La Figura 4.16 muestra los promedios por hora de los valores medidos de concentración de  $PM_{2.5}$  durante el monitoreo de invierno en Santa Catarina. A las 0:00 horas se tienen concentraciones de  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que disminuyen hasta  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 9:00 horas para volver a aumentar hasta 17 o  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el día y la noche. La concentración cambia su tendencia hacia el aumento a partir de las 21:00 Hrs. conservando este comportamiento hasta las 1:00 Hrs. del día siguiente. La concentración promedio de este periodo fue  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con una desviación estándar de  $4.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



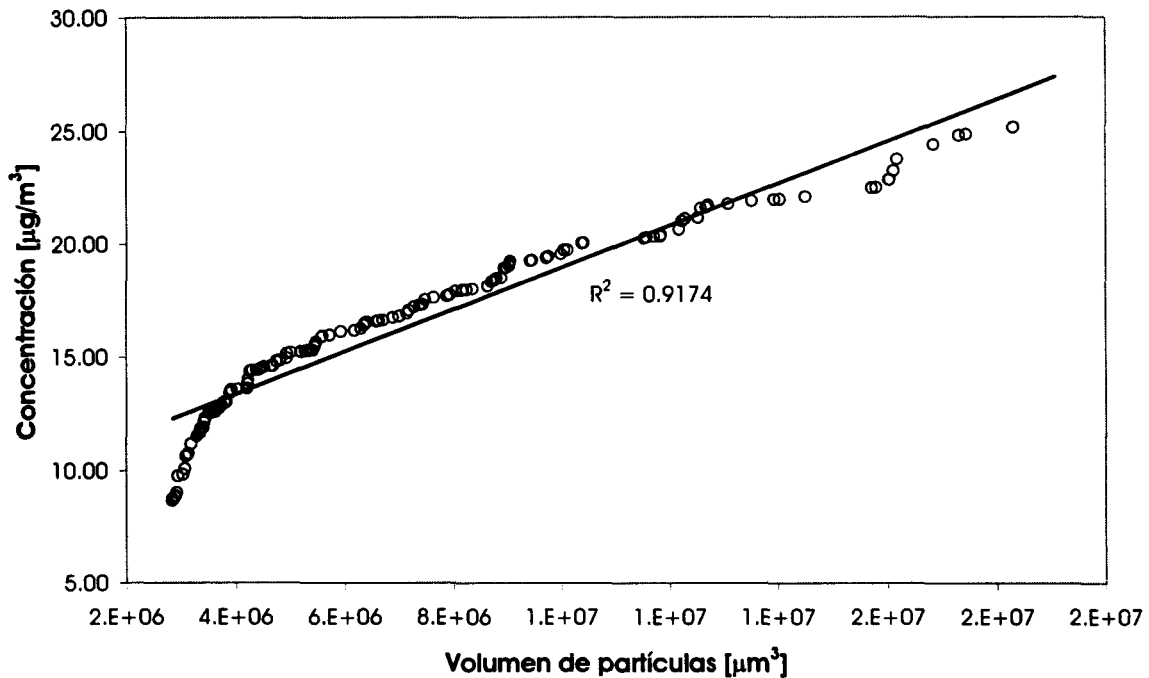
**Figura 4.16 Perfil diario de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.**

La correlación obtenida de los datos de concentración y volumen de PM<sub>2.5</sub> se muestra en la Figura 4.17. El valor obtenido de R<sup>2</sup> en esta ocasión es bastante bueno como el del monitoreo de invierno en la zona sur del AMM y es adecuado para comparar los métodos empleados para el acopio de datos. La Figura 4.17 muestra una buena consistencia de los datos del CI-500 y del Data RAM, en la misma figura se observa un desfase del comportamiento lineal a bajas concentraciones de PM<sub>2.5</sub>.

#### **4.5 Análisis de las características físicas del estudio de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el periodo primavera-verano en el sur del AMM.**

En esta sección se muestran los resultados de la campaña de monitoreo realizada en el periodo de primavera-verano dentro de las instalaciones de la escuela primaria Alberto Jáuregui en el Sur del AMM. Esta fase del monitoreo se realizó del 3 al 13 de Junio del 2005 usando los mismos equipos que en la campaña de invierno discutida en la sección 4.2. Las

fechas exactas de inicio y término son el 3 de Junio a las 17:10 y el 13 de Junio a las 12:10 Hrs.



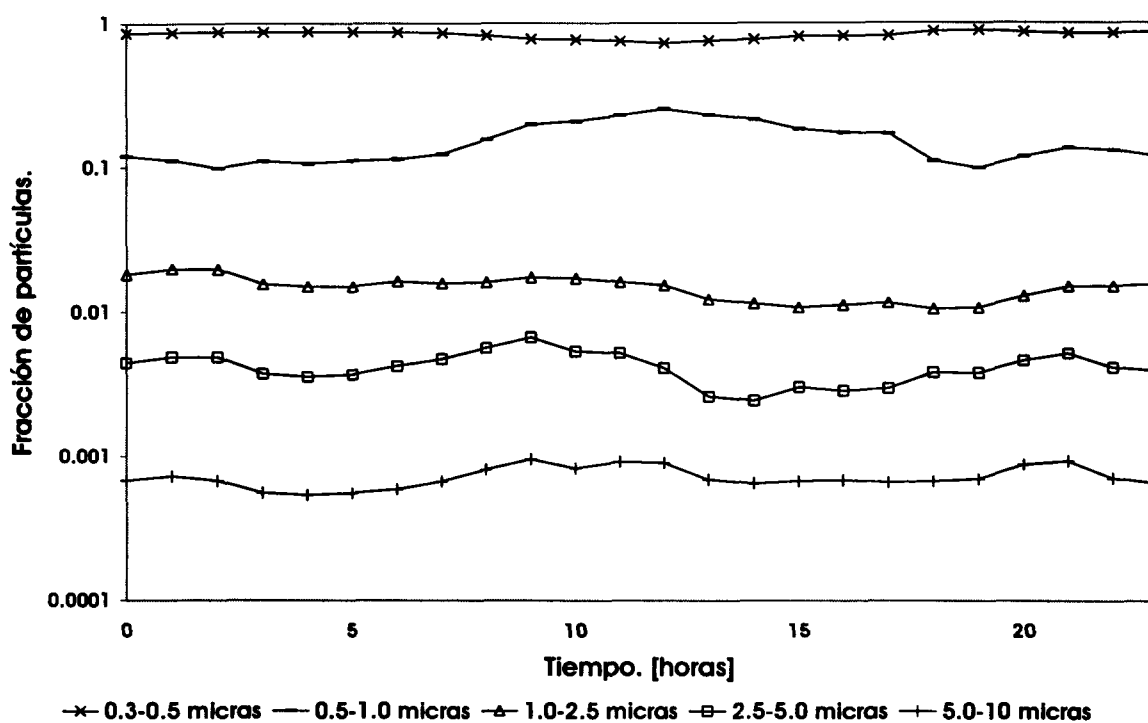
**Figura 4.17** Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 400 y el CI-500 del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.

#### 4.5.1 Distribución de tamaño.

La Figura 4.18 muestra las gráficas de las fracciones con respecto a la cantidad total de partículas calculadas con los datos obtenidos de la distribución de tamaño en el monitoreo de primavera-verano de esta investigación.

Similarmente al comportamiento de las partículas mostrado en las Figuras 4.8 y 4.13 en las que las partículas más pequeñas se encuentran en mayor cantidad. En la Figura 4.18 las diferencias son muy claras y las concentraciones en número son más estables que en las Figuras 4.7 y 4.15. Las proporciones de diferencia numérica se conservan entre las partículas con un diámetro entre 0.3 y 0.5 µm, que representan aproximadamente más del 90% de la

muestra total, y las partículas cuyo diámetro oscila entre 0.55 y 10  $\mu\text{m}$  las cuales se reparten en el 10% restante del muestreo. Los datos anteriores son el promedio de 4 registros tomados por el Climet en una hora de muestreo.



**Figura 4.18** Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.

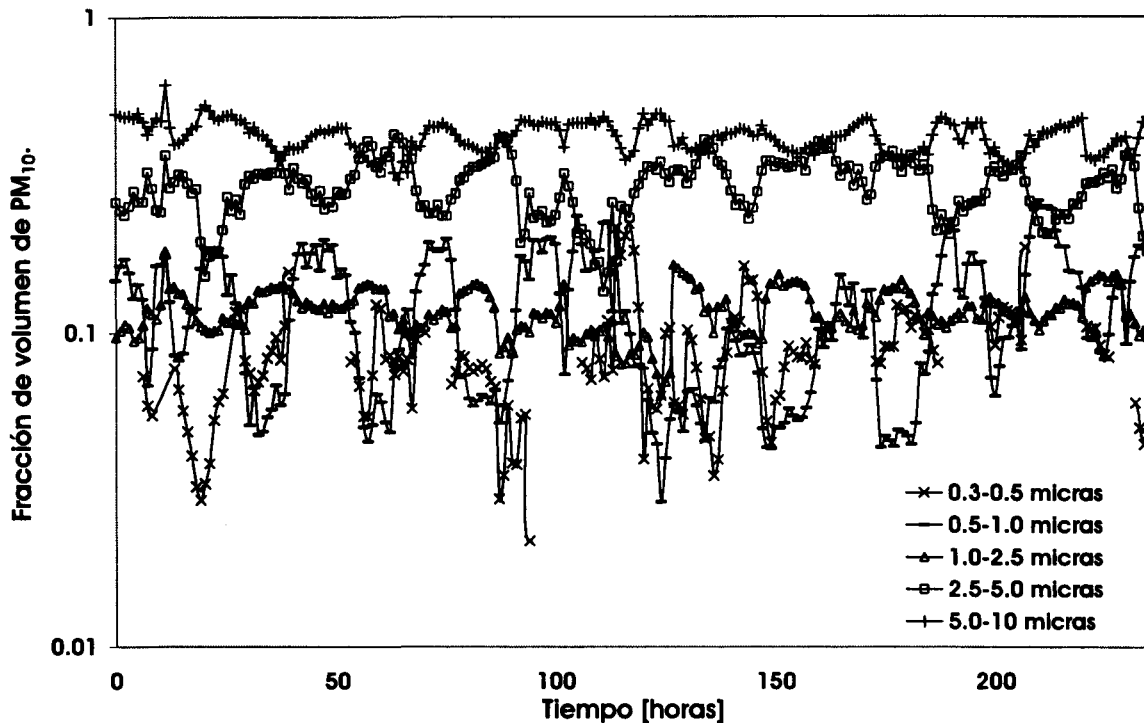
#### 4.5.2 Distribución de volumen.

La Figura 4.19 muestra las fracciones de los volúmenes calculados a partir de las cantidades de partículas para cada intervalo de tamaño según los datos obtenidos para este monitoreo.

La Figura 4.19 muestra que las fracciones de partículas de los intervalos de tamaño menores a 2.5  $\mu\text{m}$  se encuentran en menor cantidad con respecto a las partículas que tienen un tamaño mayor. La diferencia con las Figuras 4.9 y 4.14 es que en la Figura 4.19 la brecha entra las partículas con un diámetro de 2.5  $\mu\text{m}$  o menos y las partículas de más de 2.5  $\mu\text{m}$ , no es tan grande. Se observa también que las fracciones de volumen correspondiente a las



partículas en el intervalo 0.5 a 1.0  $\mu\text{m}$  llegan a ser mayores que las fracciones de las partículas entre 1.0 y 2.5  $\mu\text{m}$ .

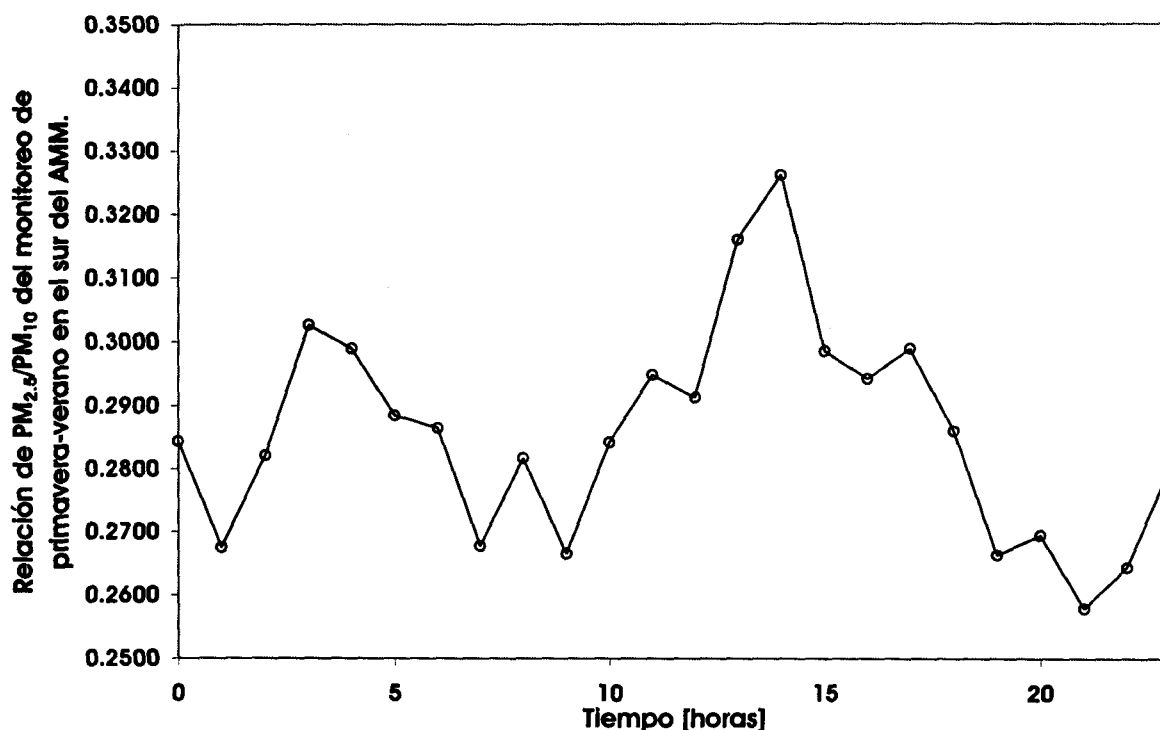


**Figura 4.19** Fracción de volumen de partículas del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.

La curva correspondiente al intervalo de 0.3 a 0.5  $\mu\text{m}$  tiene varias discontinuidades en la Figura 4.19. La razón de esto es que en ese intervalo de partículas el Climet CI-500 es superado en su capacidad de conteo por las partículas que carga la muestra dentro del intervalo de tamaño de 0.3 a 0.5  $\mu\text{m}$ , el equipo reporta estos hechos con la leyenda “Over Ride” y no con una cantidad, por lo que en los cálculos es necesario excluir estos puntos y también en las figuras.

En la Figura 4.20 se muestra la razón  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ . Se tienen picos de volumen de  $\text{PM}_{2.5}$  entre 30 y 33 % además de que la proporción con respecto al  $\text{PM}_{10}$  aumenta entre las 10:00 y las 17:00 horas.

Estos valores son consistentes con los de la Figura 4.10 que corresponde a la misma relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  pero ocurrida durante los días 3 al 9 de Marzo en el mismo sitio, lo que implica que la razón  $PM_{2.5}/PM_{10}$  es la misma tanto en el invierno como en el periodo de primavera-verano en el sur del AMM.



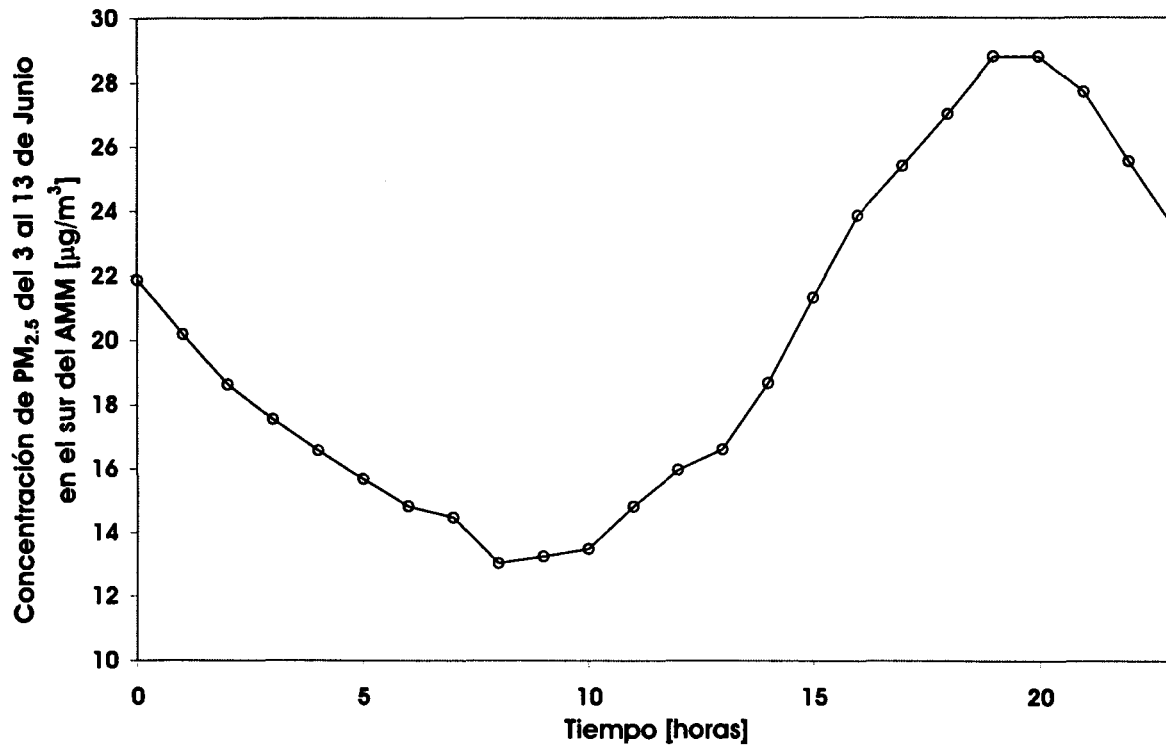
**Figura 4.20** Relación de  $PM_{2.5}/PM_{10}$  en el monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.

#### 4.5.3 Concentración de $PM_{2.5}$ .

La Figura 4.21 muestra el perfil de concentración de  $PM_{2.5}$ , indicando que la concentración de  $PM_{2.5}$  se eleva a partir de las 8:00 desde  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y esta tendencia se conserva hasta las 20:00 horas, donde se alcanza un valor máximo de  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente, como consecuencia de la actividad registrada en el lugar.

En el monitoreo de invierno se observó un perfil promedio distinto al de primavera-verano que se muestra la Figura 4.21. En invierno la tendencia a subir se manifiesta desde las

4:00 horas a una concentración de  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta llegar a un valor cercano a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 14:00 horas en donde las disminuciones ocurren. El perfil de la Figura 4.21 no se explica como un efecto local ya que la fracción de  $\text{PM}_{2.5}$  puede venir de otras fuentes y su efecto puede ser secundario.



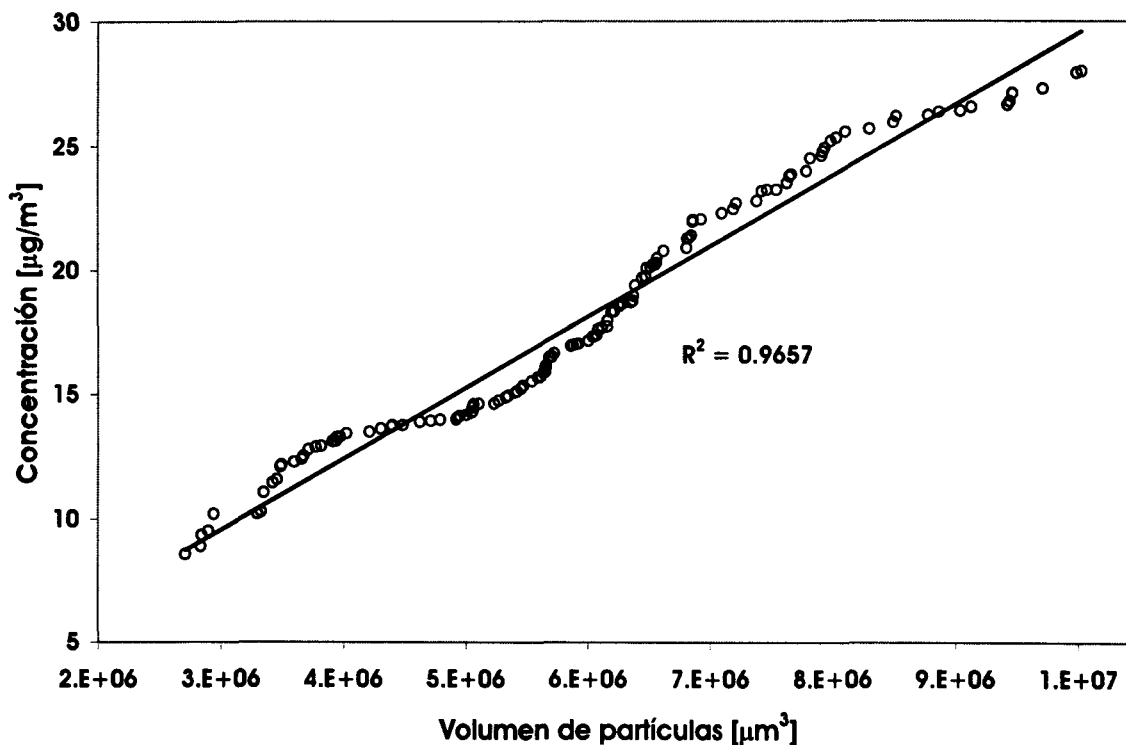
**Figura 4.21 Perfil diario de concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  en el monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.**

La concentración promedio y desviación estándar del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM son  $19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $6.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

Por último, con respecto al periodo de monitoreo discutido en esta sección, se muestra en la Figura 4.22 la correlación obtenida para la concentración y el volumen de  $\text{PM}_{2.5}$  en el sur del AMM.

El valor de la correlación obtenida en este periodo,  $R^2 = 0.9657$ , es el mejor hasta este punto, lo cual indica que existe concordancia entre los datos del CI-500 para estimar el

volumen y los del Data RAM 4 para medir concentraciones de  $PM_{2.5}$ . Otro factor que debe tomarse en cuenta para la justificación de valores tan altos de correlación es el número de datos, tanto de la cantidad como de la concentración de  $PM_{2.5}$ , tan grande que se tienen en los diferentes periodos de monitoreo.



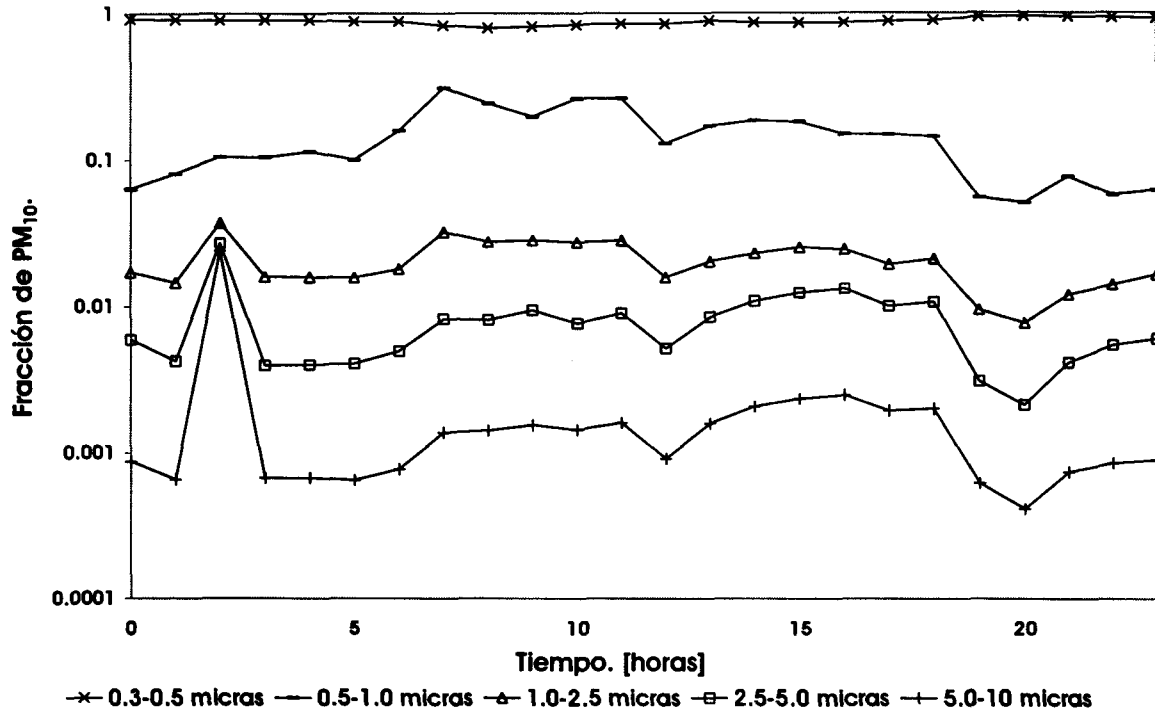
**Figura 4.22** Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500 del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio.

#### **4.6** Análisis de las características físicas del estudio de partículas $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en el periodo primavera-verano en Santa Catarina.

En esta sección se discuten los resultados obtenidos de los datos de cantidad y concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  tomados en Santa Catarina durante el periodo de primavera-verano.

#### 4.6.1 Distribución de tamaño de partículas.

La Figura 4.23 muestra los datos de cantidad de partículas graficados obtenidos en este sitio.



**Figura 4.23** Fracción del tamaño de partícula del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.

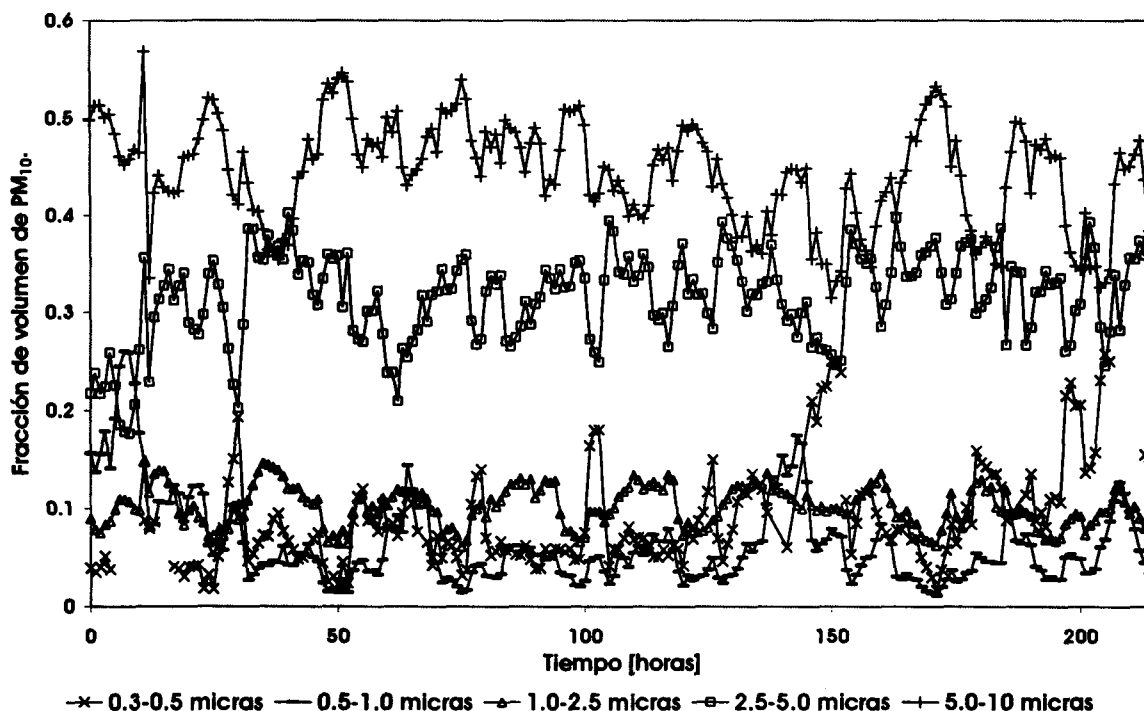
La Figura 4.23 no muestra variaciones en cuanto a las cantidades de partículas en cada intervalo de tamaño, se conservan las mismas proporciones de diferencia entre las partículas con diámetros más pequeños (0.3 a 0.5  $\mu\text{m}$ ) con respecto a las del intervalo de tamaño más grande.

Las fracciones de partículas incluidas en los intervalos de 1.0 a 10  $\mu\text{m}$  muestran un aumento en su cantidad a las 3:00 horas y una alta cantidad de partículas desde las 7:00 hasta las 11:00 horas. Este comportamiento también se observa en las partículas en el intervalo de 0.5 a 1.0  $\mu\text{m}$ . Como se ha mencionado antes, este comportamiento no puede asociarse a un efecto local ya que típicamente el  $\text{PM}_{10}$  es muy pequeño como para asociarlo únicamente a un

efecto local, lo que permite concluir que las fuentes de estas partículas pueden ser de distinta naturaleza.

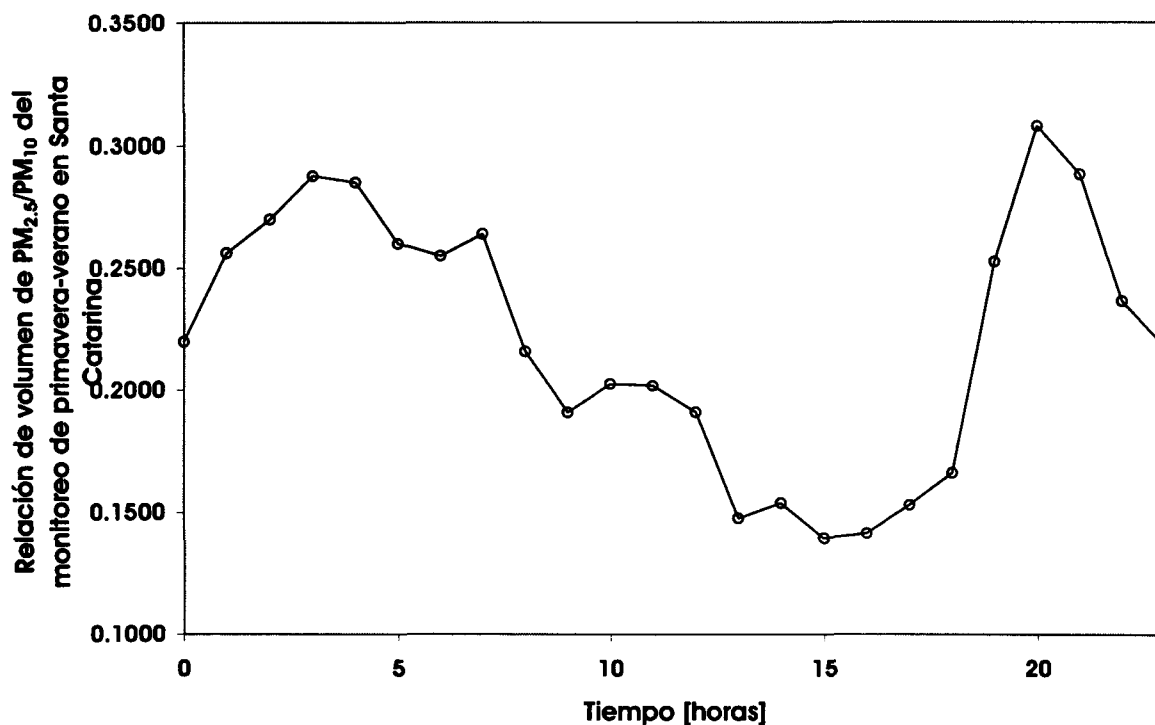
#### 4.6.2 Distribución de volumen.

Los volúmenes calculados de cada intervalo en la Figura 4.24 muestran que en esta ocasión la fracción más pequeña de la muestra pertenece a las partículas con diámetro de 0.5 a 1  $\mu\text{m}$ . Se observa también que la contribución volumétrica de las partículas de diámetros entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$  es mayor que las de las partículas con diámetros menores a 2.5  $\mu\text{m}$ , como ya se ha visto antes. Lo que significa que aunque las partículas más finas abundan en cantidad por cada muestra, su volumen en realidad aporta muy poco.



**Figura 4.24** Fracción de volumen por intervalo de tamaño durante el monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.

La Figura 4.25 muestra la razón  $PM_{2.5}/PM_{10}$  obtenida de los datos del monitoreo del 13 al 23 de Junio en las instalaciones de la Prepa Tec Campus Santa Catarina. Esta relación indica durante las primeras horas del día la fracción  $PM_{2.5}$  representa aproximadamente el 28% del volumen total de  $PM_{10}$ , pero después de las 3:00 Hrs. la aportación de  $PM_{2.5}$  al volumen de  $PM_{10}$  disminuye a lo largo del tiempo hasta las 16:00 Hrs. donde comienza a aumentar, otra vez, el volumen de  $PM_{2.5}$  aportando hasta 30% del volumen de  $PM_{10}$ .

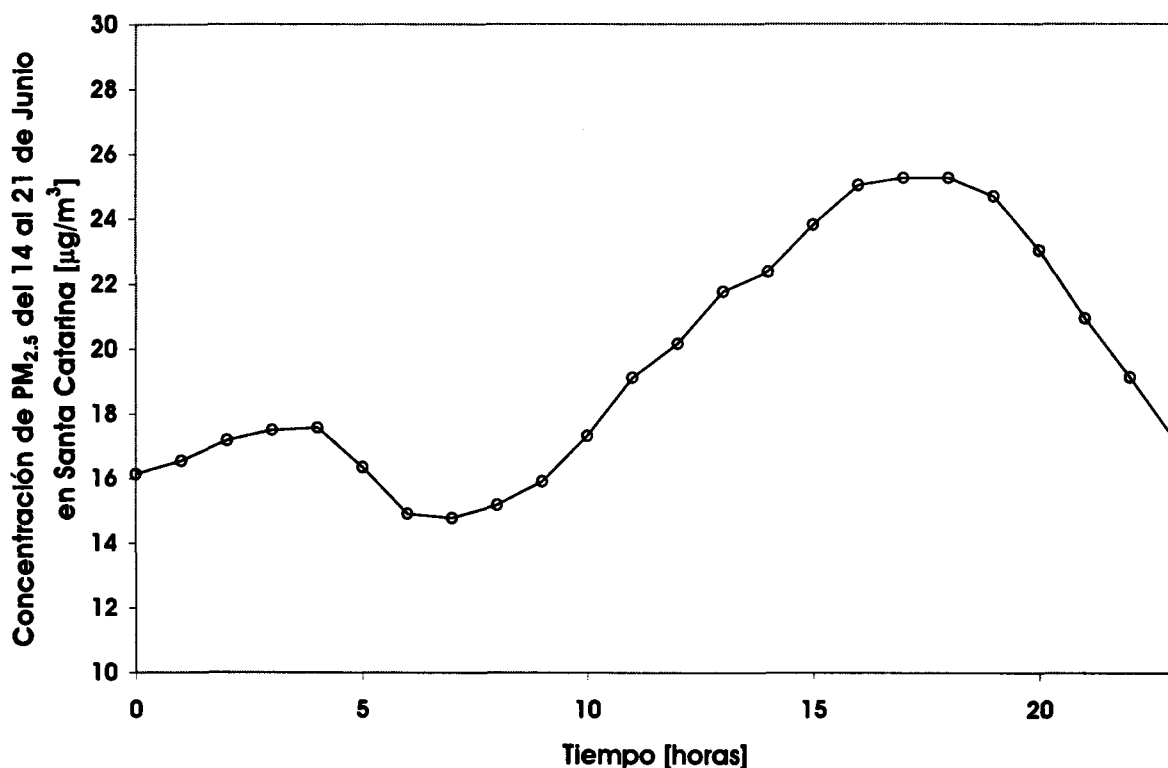


**Figura 4.25 Relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio de 2005.**

Comparada con la Figura 4.15, que corresponde a la razón  $PM_{2.5}/PM_{10}$  pero en el monitoreo realizado del 11 al 21 de Marzo, coinciden con los valores de los picos de la Figura 4.25 pero a diferencia de la Figura 4.15, la razón  $PM_{2.5}/PM_{10}$  tiene una tendencia a aumentar al principio del día alcanzando valores pico en dos diferentes horas del día en la Figura 4.25. Esto no ocurre en la Figura 4.15 ya que en esta los valores pico aparecen al inicio (1:00 Hrs.) y al final (23:00 Hrs.) del día.

### 4.6.3 Concentración de PM<sub>2.5</sub>.

El perfil de concentración de PM<sub>2.5</sub> para este periodo de monitoreo se muestra en la Figura 4.26.

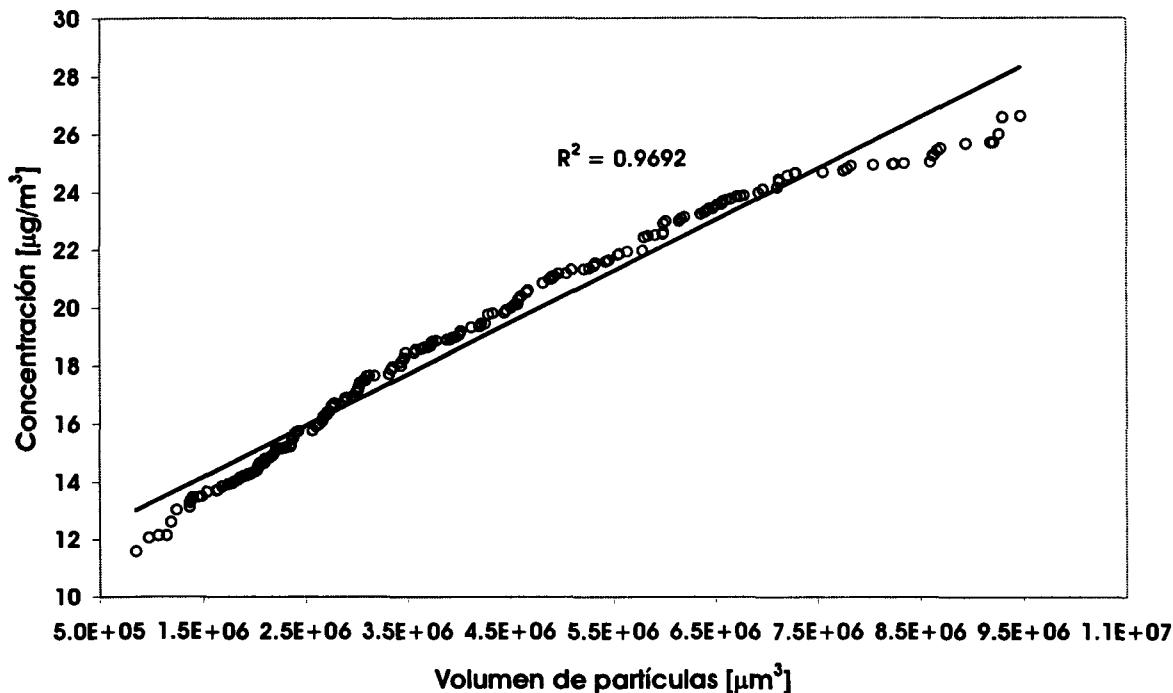


**Figura 4.26 Perfil de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> durante el monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.**

En la figura 4.26 se observan dos valores máximos. El primero ocurre a las 4:00 horas y corresponde a  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente, la concentración de PM<sub>2.5</sub> muestra un descenso hasta las 6:00 horas y durante el resto del día la concentración sigue aumentando. El segundo valor máximo se prolonga durante 4 horas, desde las 16:00 hasta las 20:00 horas, alcanzando un valor máximo cercano a los  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El promedio de la concentración de PM<sub>2.5</sub> durante el monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina fue de  $19.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con una desviación estándar de  $4.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



La correlación entre los datos del CI-500 y el Data RAM 4 se muestra en la Figura 4.27. El valor de la correlación es de 0.9692 lo que muestra una buena correlación entre los equipos utilizados en el monitoreo.



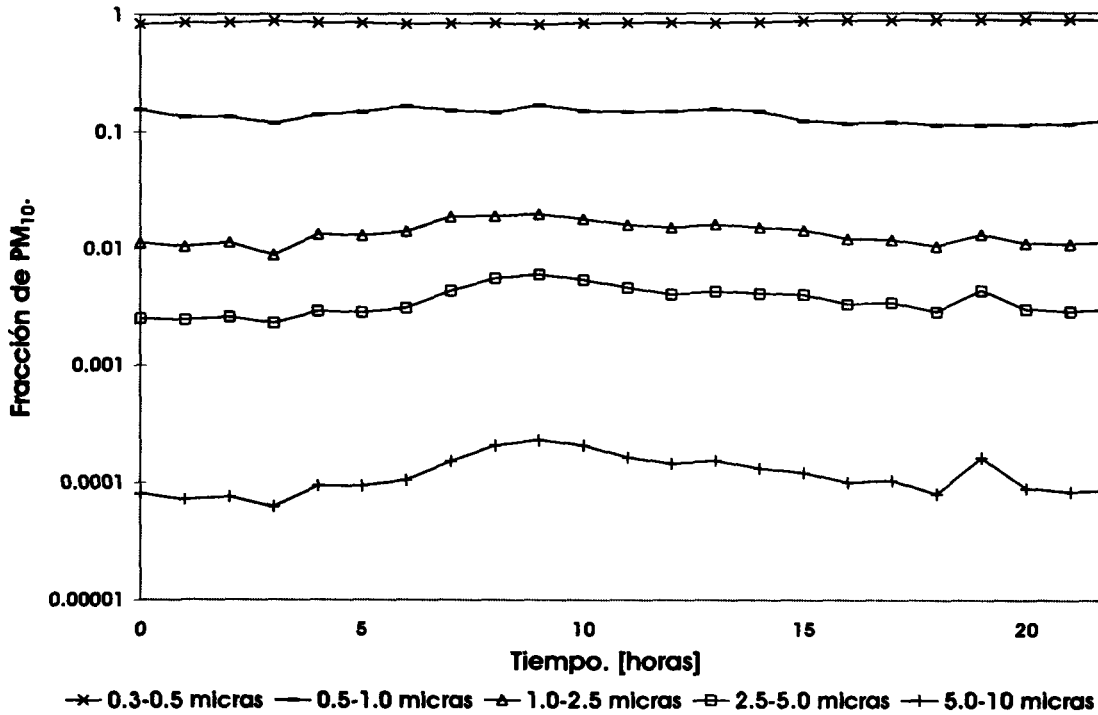
**Figura 4.27** Correlación obtenida entre los datos del Data RAM 4 y el CI-500 del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 13 al 23 de Junio del 2005.

#### **4.7** Análisis de las características físicas del estudio de partículas $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ durante el monitoreo de otoño en Santa Catarina.

En esta ocasión solo fue posible hacer el monitoreo en las instalaciones de la preparatoria del Tecnológico de Monterrey por los motivos expuestos en la sección 4.1. El monitoreo inició el 2 de Noviembre a las 17:12 horas y concluyó el 14 del mismo mes a las 18:20 horas.

#### 4.7.1 Distribución de tamaño.

Las gráficas de los datos obtenidos en el monitoreo de otoño en Santa Catarina se muestran en la Figura 4.28.



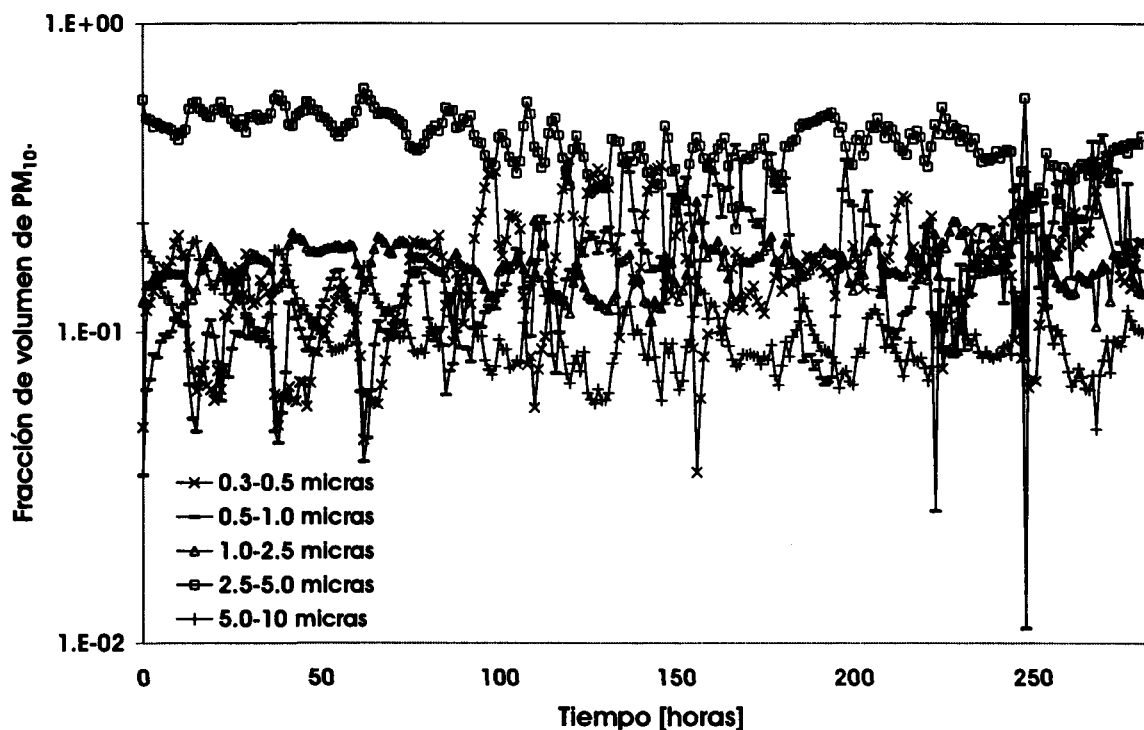
**Figura 4.28 Fracción de tamaño de partículas del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.**

A pesar de que estos monitoreos se llevaron a cabo en días fríos y relativamente más húmedos que los de invierno y primavera-verano, las partículas con diámetros entre 0.3 y 0.5  $\mu\text{m}$  alcanzan valores tan altos, y hasta más, como los que se observaron en los 2 monitoreos anteriores. En todos los demás intervalos de tamaño se puede observar también un cierto grado de atenuación en comparación con las 2 primeras temporadas de monitoreos, pero este comportamiento es aún más evidente en las partículas del intervalo de tamaño más grande, las cuales se llegan a ubicar un orden de magnitud menos en comparación con mediciones pasadas. Comparado con el monitoreo de invierno (Figura 4.7) y el de primavera-verano (Figura 4.21). Esto indica que en horas de frío, con temperaturas alrededor de los 15°C o menores, las partículas tienden a atenuarse siendo las de mayor tamaño de diámetro las más

disminuidas. Además, se ve también que existen menos fluctuaciones entre las cantidades de partículas para cada intervalo de partícula siendo las más finas las que lucen menos dispersas en comparación a los intervalos de tamaño por encima de 0.5  $\mu\text{m}$ . En general, se observa que conforme el intervalo de tamaño de las partículas aumenta ocurre lo mismo con la magnitud de las fluctuaciones de las partículas. Las partículas en el intervalo de 0.3 a 0.5  $\mu\text{m}$  y las de 2.5 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro muestran un perfil más estable que aquellas en otro intervalo de tamaño. Se observa también que las partículas en el intervalo de 5.0 a 10.0  $\mu\text{m}$  han disminuido en cantidad en comparación a los monitoreos de invierno y primavera-verano realizados en Santa Catarina como lo muestran las Figuras 4.14 y 4.23.

#### 4.7.2 Distribución de volumen.

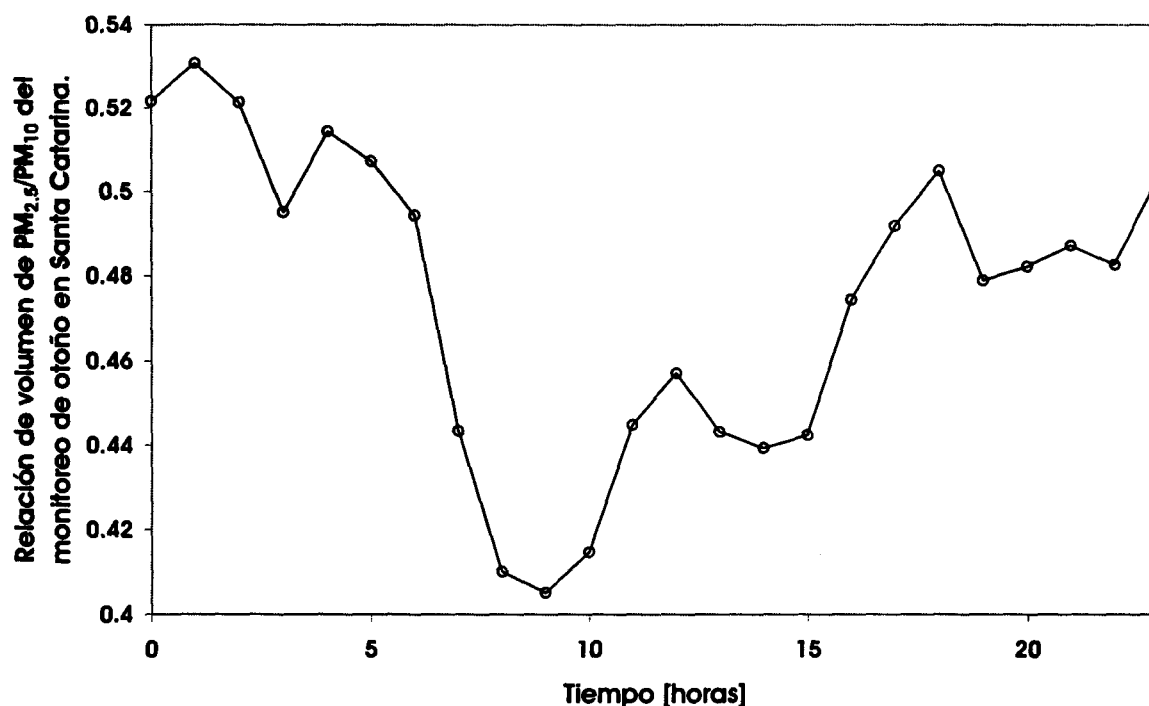
La distribución normalizada de volumen calculada a partir de los datos del monitoreo del 2 al 14 de Noviembre se muestra en la Figura 4.29.



**Figura 4.29** Fracción de volumen de partículas del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre.

La gráfica muestra que son las partículas comprendidas en el intervalo de 2.5 a 5  $\mu\text{m}$  las que representan la parte más significativa de la muestra, los valores del volumen de esta fracción se encuentran por encima de las del intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . Se observa también que las partículas que se encuentran en el intervalo de tamaño más grande representan la menor parte de esta muestra, contrario a lo que se había observado antes. Las partículas del intervalo de tamaño más pequeño ocupan la región intermedia de la distribución global de volumen. En comparación con la Figura 4.28, en la Figura 4.29 se observa que al verse disminuida la cantidad de partículas con un tamaño de diámetro en el intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$  la aportación de las mismas al volumen global de la muestra se disminuye a valores parecidos a los de la fracción de tamaño más fina. En el Anexo A se muestran las gráficas con los valores totales de cantidad de partículas en los cuales se nota con más claridad estas disminuciones.

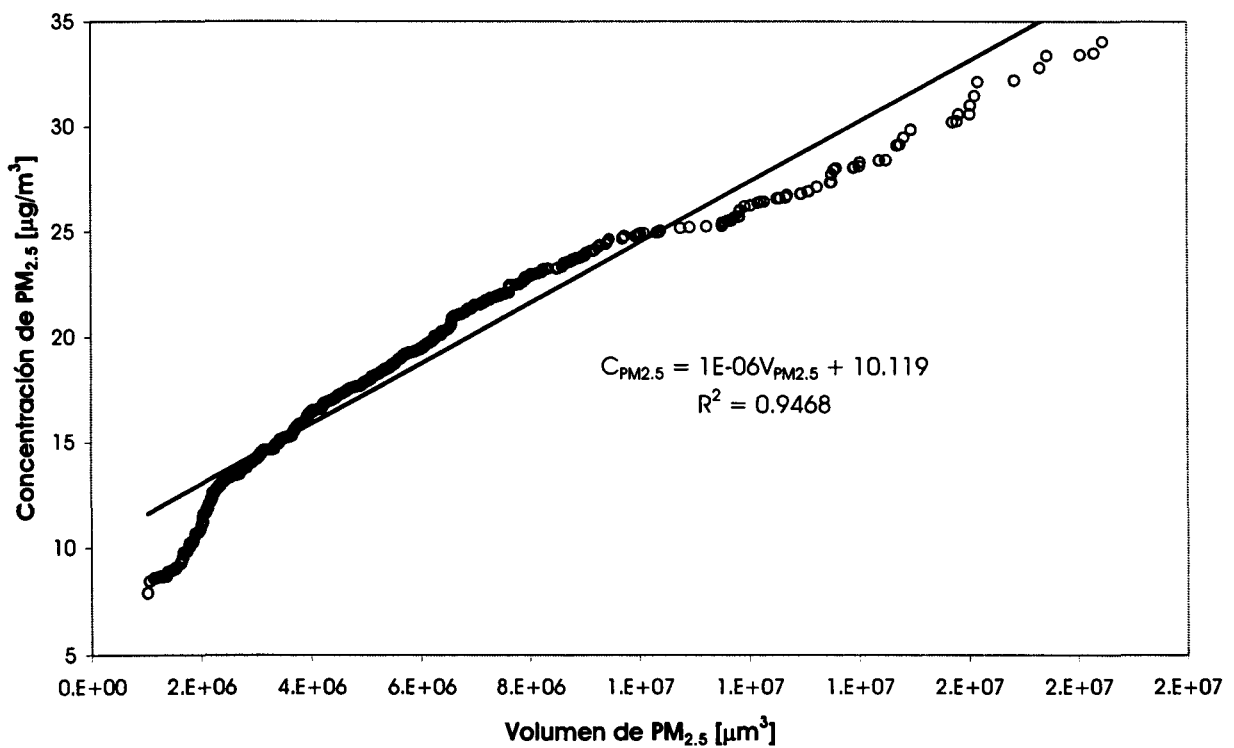
La razón  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  correspondiente al monitoreo de otoño en Santa Catarina se muestra en la Figura 4.30.



**Figura 4.30** Relación de  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.

Los valores de la razón  $PM_{2.5}/PM_{10}$  son mayores en este monitoreo ya que en la figura anterior se aprecian 3 picos con valores un poco más elevados al 50%. Aparece además un cuarto pico con un valor alrededor de 45%. Esto indica que en los días fríos la fracción más gruesa de la muestra se atenúa hasta cantidades que permiten a la fracción de partículas menores a  $2.5 \mu m$  formar más del 40%, en promedio, del volumen de la muestra total.

En el monitoreo de otoño en Santa Catarina se tuvo una falla con el equipo Data RAM 4 por lo que no se cuenta con datos de concentración. Tomando en cuenta las correlaciones obtenidas de las Figuras 4.12, 4.17, 4.22 y 4.27, es posible obtener una expresión por medio de una relación lineal que pueda servirnos para estimar la posible concentración de  $PM_{2.5}$  en el monitoreo de otoño usando los volúmenes calculados durante el mismo monitoreo. Llevando a cabo lo anterior se obtiene la Figura 4.68.



**Figura 4.31** Correlación obtenida entre los datos de volumen y concentración de los monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM y Santa Catarina.

La Figura 4.31 demuestra que la expresión obtenida da una confiabilidad aceptable para la estimación de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a partir de los valores del volumen calculados con los datos obtenidos del CI-500.

Además de la caracterización física, se llevó a cabo el análisis químico y toxicológico de las muestras de filtros recuperadas de los equipos Partisol 2025 y del High vol, respectivamente. Los resultados de estos análisis se muestran en el Anexo B de este trabajo.

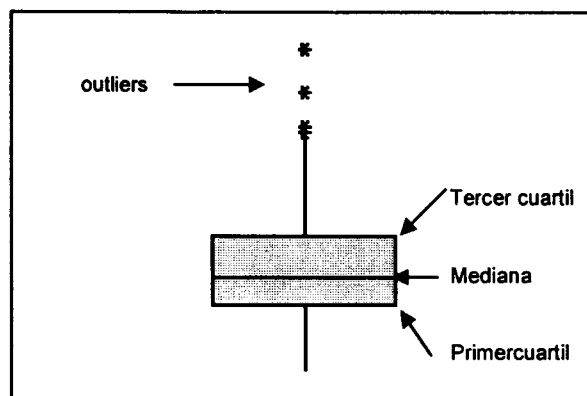
## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIACIONES ESTACIONALES Y ESPACIALES DE LAS DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

En este capítulo se describe el análisis estadístico realizado a los datos recopilados durante los monitoreos de este estudio. El capítulo está subdividido en dos secciones principales en la primera, se presentan los datos estadísticos básicos que permiten describir los comportamientos de las muestras tomadas y en la segunda, se analizan tales datos mediante las pruebas de hipótesis formuladas en la Sección 3.3.2.

#### 5.1 Datos de monitoreo por sitio y época del año.

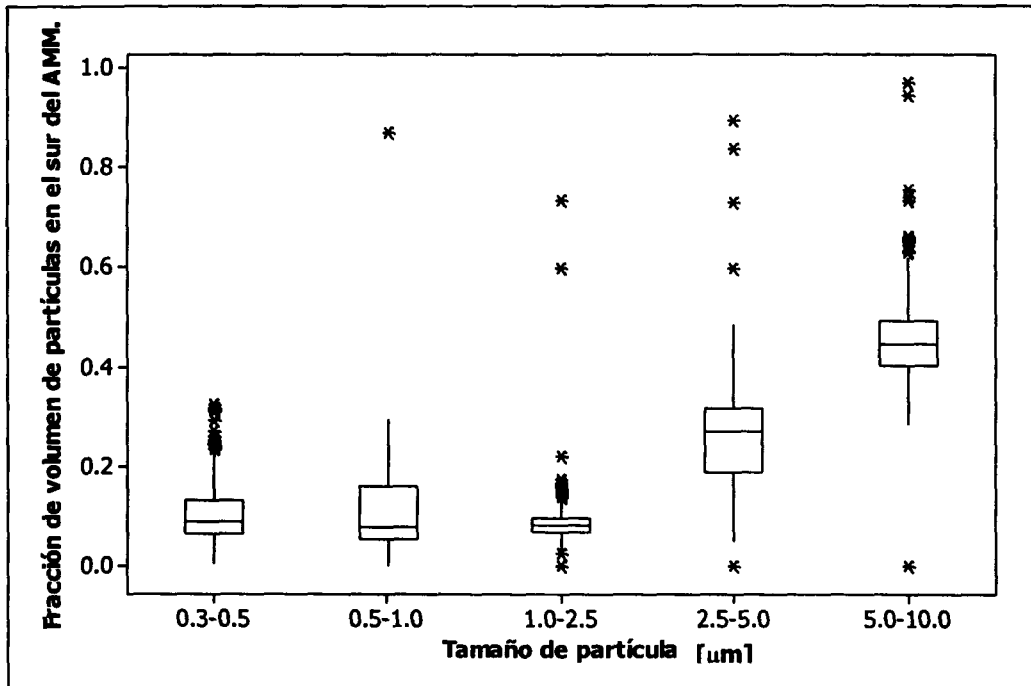
La distribución de los datos recopilados durante los monitoreos realizados se muestra en esta sección mediante diagramas de cajas que ilustran de forma sencilla el comportamiento de los datos de la siguiente manera: los bigotes se encuentran delimitados por los datos mínimo y máximo, la caja está delimitada por los cuartiles primero y tercero (25% y 75% de los datos respectivamente) y la línea transversal que divide la caja corresponde a la mediana de los datos (50%). Los puntos que quedan fuera de los bigotes son “outliers” es decir, datos inusualmente grandes o pequeños. En la Figura 5.1 se aprecian estas características.



**Figura 5.1** Diagrama de caja y bigotes.

### 5.1.1 Monitoreo de invierno.

Las Figuras 5.2 y 5.3 muestran los diagramas de caja para las fracciones en volumen de los datos tomados para cada intervalo de tamaño de la zona sur del AMM y de la Prepa Tec, respectivamente. Estos datos corresponden al monitoreo de invierno durante los días 1 al 9 de Marzo, en el sur del AMM, y en Santa Catarina del 11 al 21 del mismo mes.



**Figura 5.2** Diagramas de caja para los datos del monitoreo de invierno en el sur del AMM en el periodo del 1 al 9 de Marzo del 2005.

### 5.1.2 Monitoreo de primavera-verano.

En forma descriptiva, los datos tomados se muestran mediante diagramas de caja en la Figura 5.4 para el monitoreo en el sur del AMM y en la Figura 5.5 para el caso de Santa Catarina.



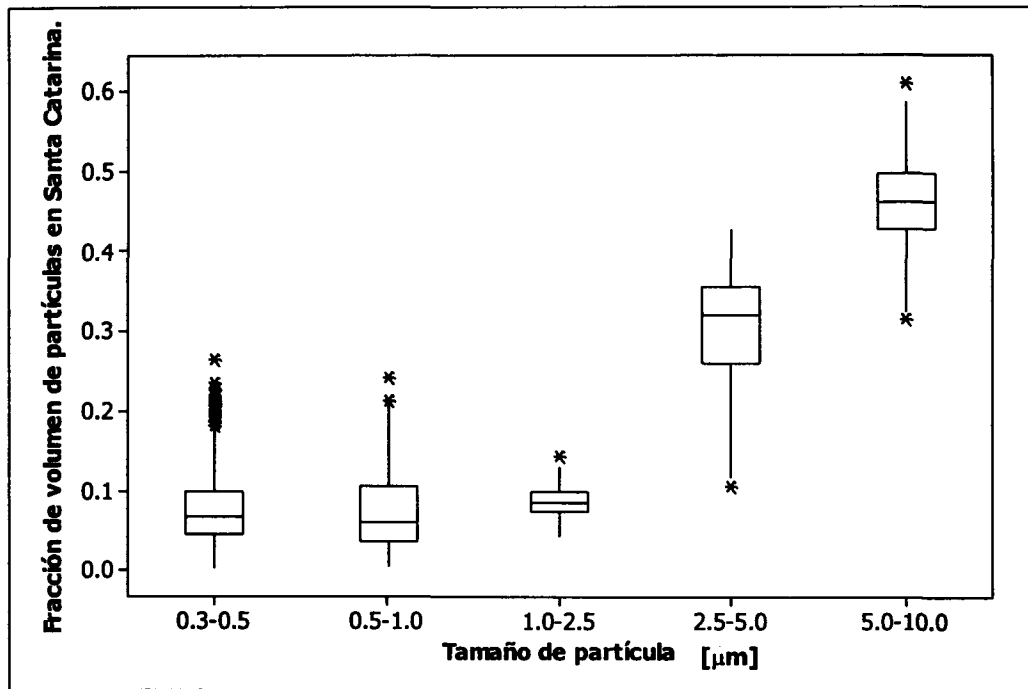


Figura 5.3 Diagramas de caja para los datos del monitoreo de invierno en Santa Catarina en el periodo del 11 al 21 de Marzo del 2005.

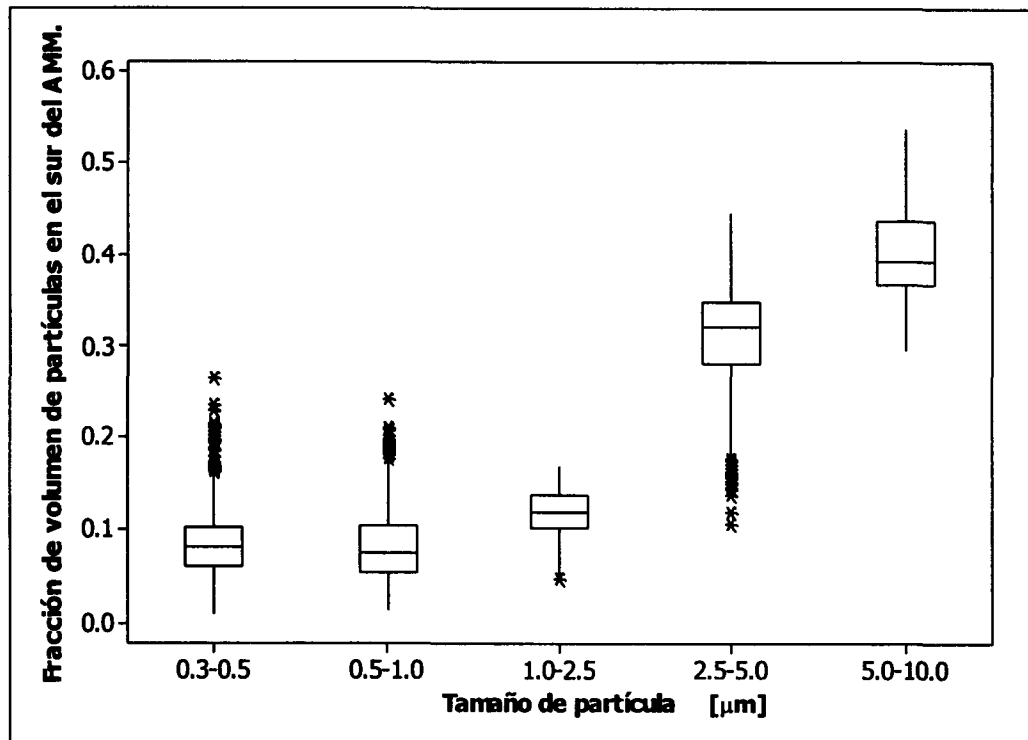
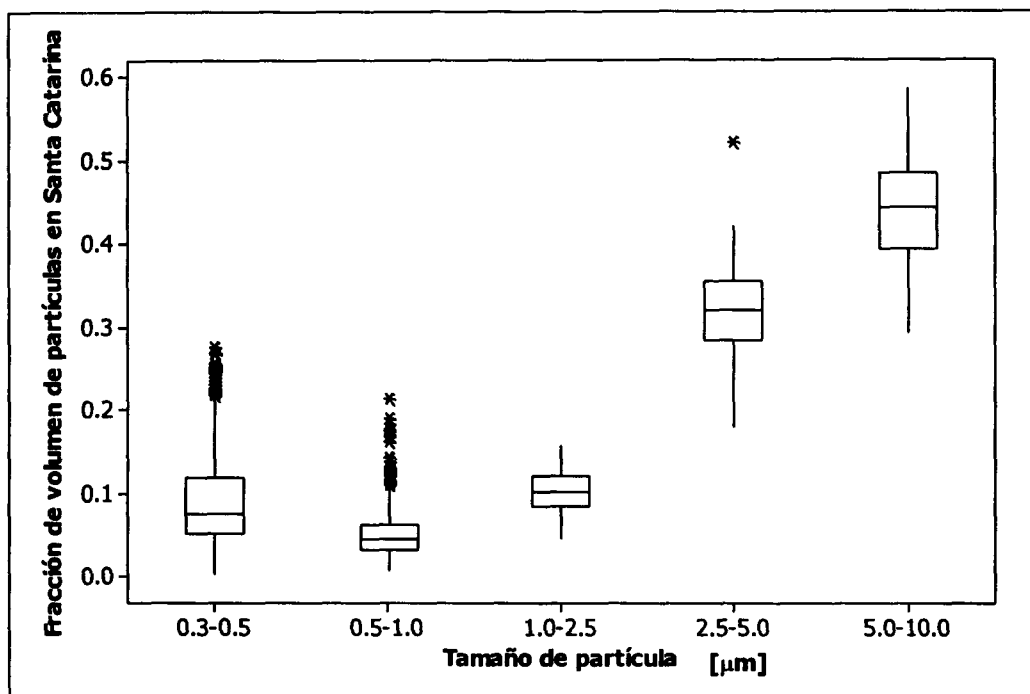


Figura 5.4 Diagramas de caja para los datos del monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM en el periodo del 3 al 13 de Junio del 2005.

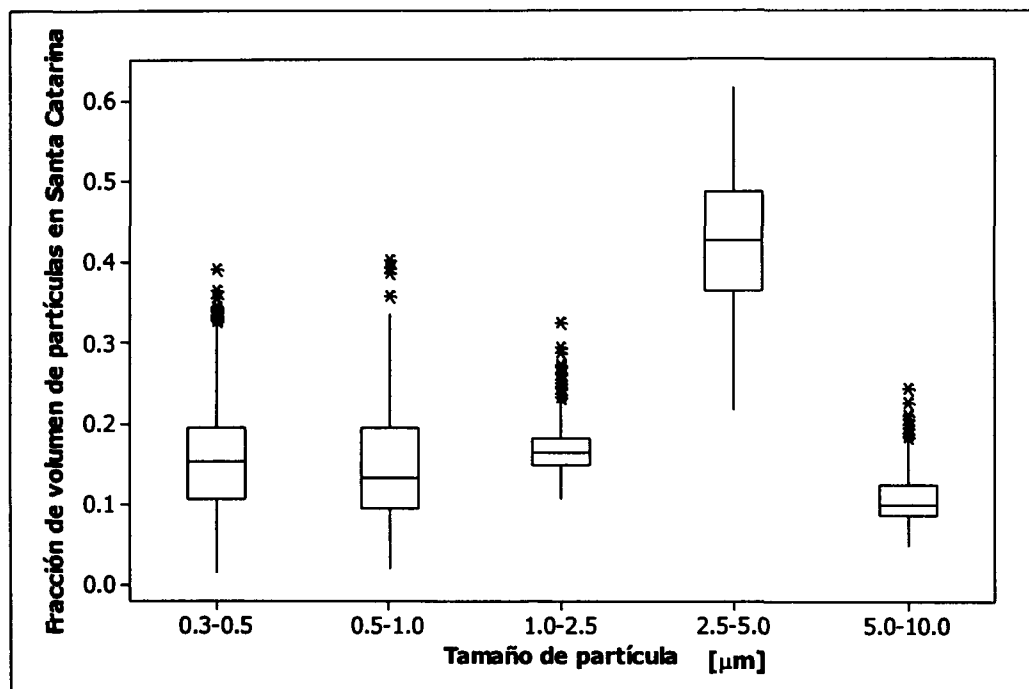


**Figura 5.5** Diagramas de caja para los datos del monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina en el periodo del 14 al 23 de Junio del 2005.

### 5.1.3 Monitoreo de otoño

En el otoño, únicamente se pudieron tomar datos para el sitio de muestreo de Santa Catarina (del 2 al 14 de noviembre). En la figura 5.6 se muestra de una manera sencilla el diagrama de caja y bigote de tal monitoreo.

En los diagramas de caja y bigotes presentados se aprecia una distribución de datos similar entre diferentes épocas del año y entre los sitios muestreados. Sin embargo, no puede realizarse una apreciación precisa sobre las diferencias entre las distribuciones de fracciones de volumen. Para evaluar si hay suficiente evidencia estadística de diferencias en tales distribuciones, se realizó una comparación estadística que permitiera analizar estas diferencias. Los resultados encontrados se describen en la siguiente sección.



**Figura 5.6** Diagramas de caja para los datos del monitoreo de otoño en Santa Catarina en el periodo del 2 al 14 de Noviembre del 2005.

## 5.2 Análisis de la variación espacial y estacional de las distribuciones de tamaño de partículas.

En esta sección se aplican técnicas estadísticas para comparar las diferencias en medias y en las varianzas de las fracciones de volúmenes de partículas. La comparación se hace de dos formas: (1) entre sitios para la misma época del año (variación espacial) y (2) entre épocas para el mismo sitio de monitoreo (variación estacional). En lo subsecuente denominaremos como sitio 1 al localizado en el sur del área metropolitana de Monterrey y como sitio 2 al localizado en Santa Catarina. Las pruebas anteriores se hicieron para los dos sitios para las épocas de invierno y primavera-verano. En el caso del sitio 2, se obtuvieron además datos para la época de otoño, por lo que para este sitio se comparan entre si las épocas de primavera-verano, otoño e invierno.

La prueba de diferencia de varianzas se realiza mediante una prueba de Fisher de las fracciones de los volúmenes calculados para cada intervalo de tamaño de diámetro de partículas. Dependiendo si se encuentra que las varianzas son diferentes o iguales se hace la prueba t para la diferencia de medias de las fracciones de volumen para los dos casos mencionados.

El objetivo de aplicar un análisis estadístico a los volúmenes calculados en el monitoreo es comprobar si existen variaciones espaciales y estacionales en las distribuciones de tamaño de partículas en el AMM. El análisis estadístico fue realizado con el programa Minitab® 14. Las decisiones sobre aceptar o rechazar una hipótesis nula ( $H_0$ ) respecto a la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) fueron realizadas en base al valor p el cual mide el grado de evidencia en contra de la hipótesis nula que refleja la muestra obtenida. Un valor p pequeño es un indicador de que en la muestra  $H_0$  es falsa, o bien, que debe ser rechazada. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes secciones.

### **5.2.1 Evaluación de la variación espacial.**

#### **Monitoreo de invierno.**

La Tabla 5.1 contiene las medias y varianzas de las fracciones de volumen de los datos de monitoreo realizados durante la temporada invernal en el sitio 1 del 1 al 9 de Marzo y en el sitio 2 del 11 al 21 de Marzo.

#### **Prueba de igualdad de varianzas durante el invierno: Prueba F.**

A partir de los valores de la media ( $\mu_i$ ) y de la desviación estándar ( $\sigma_i$ ) de los volúmenes calculados para cada intervalo de tamaño, se realizó una prueba F para determinar la igualdad (hipótesis nula) o diferencia (hipótesis alternativa) de la varianza para cada población comparando la varianza de la muestra obtenida en el sur del AMM ( $\sigma_1^2$ ) contra la varianza de la muestra de Santa Catarina ( $\sigma_2^2$ ). Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.1 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los datos del monitoreo de invierno.**

<b>Invierno.</b>		
<b>Lugar</b>	<b>Intervalo de diámetro de partícula [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Medias y varianzas</b>
<b>Sur del AMM Santa Catarina</b>	<b>0.3 - 0.5</b>	$\mu_1 = 0.10184$ $\sigma_1 = 0.05845$ $\mu_2 = 0.07772$ $\sigma_2 = 0.04819$
<b>Sur del AMM Santa Catarina</b>	<b>0.5 - 1.0</b>	$\mu_1 = 0.10862$ $\sigma_1 = 0.07683$ $\mu_2 = 0.07388$ $\sigma_2 = 0.04948$
<b>Sur del AMM Santa Catarina</b>	<b>1.0 - 2.5</b>	$\mu_1 = 0.08763$ $\sigma_1 = 0.04099$ $\mu_2 = 0.08515$ $\sigma_2 = 0.01581$
<b>Sur del AMM Santa Catarina</b>	<b>2.5 - 5.0</b>	$\mu_1 = 0.25380$ $\sigma_1 = 0.09635$ $\mu_2 = 0.30421$ $\sigma_2 = 0.06484$
<b>Sur del AMM Santa Catarina</b>	<b>5.0 - 10.0</b>	$\mu_1 = 0.44811$ $\sigma_1 = 0.9423$ $\mu_2 = 0.45903$ $\sigma_2 = 0.04925$

Sitio 1: Sur del AMM, Sitio 2: Santa Catarina.

**Tabla 5.2 Análisis de varianzas de cada población en invierno.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de varianza			
	Hipótesis	Valor F	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1.47	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.41	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	6.73	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.21	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.36	0.00	Se rechaza $H_0$

Sitio 1: Sur del AMM; Sitio 2: Santa Catarina.

A partir de los resultados de la Tabla 5.2, basándose en el número calculado del valor p, se concluye que las varianzas de las poblaciones de los datos de tamaño de partículas obtenidos en el sur del AMM y en Santa Catarina son diferentes para un valor de significancia  $\alpha=0.05$ .

**Prueba de diferencia en medias durante el invierno: Prueba t.**

Para determinar la igualdad entre las medias de las fracciones de volumen de los intervalos de tamaño de las muestras para los 2 sitios se realizó una prueba t. Esta prueba se realizó para el caso en que las varianzas son diferentes como se mostró en la Tabla 5.2.

La Tabla 5.3 resume los resultados obtenidos para la prueba t de los volúmenes de cada intervalo de tamaño de las muestras de datos obtenidos durante el monitoreo invernal en el sur de Monterrey los días 1 al 9 de Marzo y en Santa Catarina del 11 al 21 del mismo mes.

**Tabla 5.3 Resultados de la prueba t para las 2 poblaciones de datos obtenidos en los monitoreos de invierno.**

Invierno				
Intervalo de diámetro de partícula [μm]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	7.96	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	9.46	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	1.4	0.16	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-10.81	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-2.55	0.00	Se rechaza $H_0$

Sitio 1: Sur del AMM, Sitio 2: Santa Catarina.

Según los valores de p obtenidos para los datos analizados, los promedios de fracciones de volumen de cada intervalo de cada sitio de monitoreo son distintos. Es decir, los datos obtenidos en el sur del AMM son independientes, estadísticamente, de aquellos que se obtuvieron en Santa Catarina y viceversa, excepto para el intervalo de 1.0 a 2.5 micras, donde no se encontró suficiente evidencia estadística para determinar que la media de las poblaciones es distinta para este intervalo de tamaño.

El valor p de 0.59 obtenido en la prueba de diferencia en las medias indica que ambas muestras son estadísticamente semejantes. De estos resultados se concluye que se deben efectuar muestreos por zona para que sea representativo del AMM para poder caracterizar físicamente a la muestra.

#### **Monitoreo de primavera-verano.**

Los datos del monitoreo de primavera-verano fueron tomados durante los días 3 al 13 de Junio en el sur del AMM y 14 al 23 de Junio en Santa Catarina. Los datos fueron analizados con las mismas técnicas estadísticas que los de invierno discutidos anteriormente. Las medias y varianzas de las distribuciones de tamaño tomados en el período se muestran en la Tabla 5.4.

A partir de estos valores se procedió a hacer las pruebas de varianzas y de diferencia en las medias entre los 2 sitios de muestreo para cada intervalo de tamaño partículas.

#### **Prueba de igualdad de varianzas durante el periodo de primavera-verano: Prueba F.**

Como en el caso del monitoreo invernal, para determinar si las varianzas pueden tomarse como iguales o diferentes en los sitios de monitoreo para cada intervalo de tamaño, los datos obtenidos en el periodo de primavera-verano se someten a una prueba F que se muestra en la Tabla 5.5.



**Tabla 5.4 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los datos obtenidos del monitoreo de primavera-verano.**

Primavera-Verano.		
Lugar	Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Medias y varianzas
Sur del AMM Santa Catarina	0.3 - 0.5	$\mu_1 = 0.08479$ $\sigma_1 = 0.03574$ $\mu_2 = 0.09082$ $\sigma_2 = 0.05618$
Sur del AMM Santa Catarina	0.5 - 1.0	$\mu_1 = 0.08582$ $\sigma_1 = 0.04210$ $\mu_2 = 0.05017$ $\sigma_2 = 0.02835$
Sur del AMM Santa Catarina	1.0 - 2.5	$\mu_1 = 0.11819$ $\sigma_1 = 0.02297$ $\mu_2 = 0.10043$ $\sigma_2 = 0.02228$
Sur del AMM Santa Catarina	2.5 - 5.0	$\mu_1 = 0.30870$ $\sigma_1 = 0.06239$ $\mu_2 = 0.31865$ $\sigma_2 = 0.04795$
Sur del AMM Santa Catarina	5.0 - 10.0	$\mu_1 = 0.40250$ $\sigma_1 = 0.04758$ $\mu_2 = 0.43993$ $\sigma_2 = 0.05842$

Sitio 1: Sur del AMM; Sitio 2: Santa Catarina.

En la Tabla 5.5 se observa que todos los valores p calculados se encuentran debajo del valor de aceptación, excepto en el intervalo de 1.0 a 2.5, para el cual la prueba de medias para este intervalo fue realizada tomando en consideración la igualdad de varianzas.

**Tabla 5.5 Análisis de las varianzas de cada población en primavera-verano.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de varianza			
	Hipótesis	Valor F	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.40	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.21	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1.06	0.436	Se acepta $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1.69	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.66	0.00	Se rechaza $H_0$

Sitio 1: Sur del AMM; Sitio 2: Santa Catarina.

**Prueba de diferencia de medias para el periodo de primavera-verano: Prueba t.**

La Tabla 5.6 contiene los resultados de la prueba de medias realizada para cada intervalo de tamaño de diámetro para los datos del monitoreo de primavera-verano. Los valores p muestran que, para todos los intervalos de tamaño, la evidencia estadística indica que las medias de los datos en cada sitio de monitoreo son diferentes por lo que se puede decir que no existe una dependencia entre los datos de ambos sitios. Por los resultados obtenidos concluimos que las medias y varianzas son diferentes para todos los intervalos de tamaño. Es recomendable monitorear en los sitios para poder caracterizar los tamaños de partículas ya que no es posible generalizar de un punto hacia otro. Esto implica que durante la época de primavera-verano es necesario llevar a cabo monitoreos de partículas en distintas zonas, tal como se concluyó en la época de invierno según el análisis estadístico aplicado a los datos.

**Tabla 5.6 Resultados de la prueba t para las 2 poblaciones de datos obtenidas en los monitoreos de primavera-verano.**

Primavera-Verano				
Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-2.34	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	17.36	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	14.01	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-3.15	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-12.66	0.00	Se rechaza $H_0$

Sitio 1: Sur del AMM, Sitio 2: Santa Catarina.

### 5.2.2 Evaluación de variación estacional.

En esta sección comparamos variaciones estacionales entre las medias y varianzas de las diferentes distribuciones de tamaño para el mismo sitio. Como se comentó anteriormente en el otoño fue posible tomar datos en Santa Catarina, por lo que también se comparan las medias y varianzas de otoño con datos para los periodos de invierno y primavera-verano en este sitio.

## Monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.

En la Tabla 5.7 se muestra el resumen de las medias y varianzas de las distribuciones de tamaño del sitio de monitoreo en el sur de Monterrey para las 2 épocas que se estudiaron.

**Tabla 5.7 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.**

Época	Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Medias y varianzas
Invierno Primavera-Verano	0.3 - 0.5	$\mu_1 = 0.10184$ $\sigma_1 = 0.05845$ $\mu_2 = 0.08479$ $\sigma_2 = 0.03574$
Invierno Primavera-Verano	0.5 - 1.0	$\mu_1 = 0.10862$ $\sigma_1 = 0.07683$ $\mu_2 = 0.08582$ $\sigma_2 = 0.04210$
Invierno Primavera-Verano	1.0 - 2.5	$\mu_1 = 0.08763$ $\sigma_1 = 0.04099$ $\mu_2 = 0.11819$ $\sigma_2 = 0.02297$
Invierno Primavera-Verano	2.5 - 5.0	$\mu_1 = 0.25380$ $\sigma_1 = 0.09635$ $\mu_2 = 0.30870$ $\sigma_2 = 0.06239$
Invierno Primavera-Verano	5.0 - 10.0	$\mu_1 = 0.44811$ $\sigma_1 = 0.09423$ $\mu_2 = 0.40250$ $\sigma_2 = 0.04758$

(1) Invierno, (2) Primavera-Verano.

**Prueba de igualdad en varianzas en el Sitio 1 (invierno y primavera-verano): Prueba F.**

Los resultados de la prueba realizada a la muestra de datos indican que existe evidencia estadística de que las varianzas de cada época en el sitio sur de muestreo son diferentes. Por lo anterior, la prueba de diferencia de las medias para distintas épocas en los mismos sitios se aplica para el caso de que  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ . Tales resultados se muestran en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8 Resultados de la prueba de diferencias en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos en invierno y primavera-verano en el sur del AMM.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de varianza			
	Hipótesis	Valor F	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.67	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.33	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.18	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.39	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.92	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Primavera-Verano.

**Prueba de diferencia en las medias en el Sitio 1 (invierno y primavera-verano): Prueba t.**

La Tabla 5.9 contiene el resumen de los resultados obtenidos de la prueba de medias de los volúmenes normalizados de las muestras obtenidas en invierno y primavera-verano en el sur del área metropolitana de Monterrey.

Las pruebas de diferencia en las medias indican que existe suficiente evidencia estadística para concluir que los promedios de los volúmenes normalizados son diferentes para todos los intervalos de tamaño.

**Tabla 5.9 Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras de invierno y primavera-verano en el sur del AMM.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	6.08	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	6.37	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-15.90	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-11.68	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	10.58	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Primavera-Verano

**Monitoreos en invierno, primavera-verano y otoño en Santa Catarina.**

La Tabla 5.10 muestra las medias y varianzas de los volúmenes normalizados de los datos para los 2 períodos mencionados anteriormente.

**Tabla 5.10 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y primavera-verano en Santa Catarina.**

Época	Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Medias y varianzas
Invierno Primavera-Verano	0.3 - 0.5	$\mu_1 = 0.07772$ $\sigma_1 = 0.04819$ $\mu_2 = 0.09082$ $\sigma_2 = 0.05618$
Invierno Primavera-Verano	0.5 - 1.0	$\mu_1 = 0.07388$ $\sigma_1 = 0.04948$ $\mu_2 = 0.05117$ $\sigma_2 = 0.02835$
Invierno Primavera-Verano	1.0 - 2.5	$\mu_1 = 0.08515$ $\sigma_1 = 0.01581$ $\mu_2 = 0.10043$ $\sigma_2 = 0.02228$
Invierno Primavera-Verano	2.5 - 5.0	$\mu_1 = 0.30421$ $\sigma_1 = 0.06484$ $\mu_2 = 0.31865$ $\sigma_2 = 0.04795$
Invierno Primavera-Verano	5.0 - 10.0	$\mu_1 = 0.45903$ $\sigma_1 = 0.04925$ $\mu_2 = 0.43993$ $\sigma_2 = 0.045842$

(1) Invierno; (2) Primavera-Verano.

En el caso de la preparatoria del Tecnológico de Monterrey Campus Santa Catarina se realizaron monitoreos durante el invierno, primavera-verano y otoño. En esta sección comparamos las medias y las varianzas de las tres épocas entre sí.

**Prueba de igualdad de varianzas para el Sitio 2 (invierno y primavera-verano): Prueba de Fisher.**

Los resultados del análisis de diferencias en las varianzas de los datos de la Tabla 5.11 muestran que las varianzas de todas las categorías son diferentes para las estaciones de invierno y primavera-verano.

**Tabla 5.11 Resultados de la prueba de diferencias en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y primavera-verano en Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de varianza			Conclusión
	Hipótesis	Valor F	Valor p	
0.3 - 0.5	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.74	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.05	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.50	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1.83	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.71	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Primavera-Verano.



**Prueba de diferencia en las medias en el Sitio 2 (invierno y primavera-verano): Prueba t.**

Los resultados muestran que todas las medias de volumen normalizado de todas las categorías son diferentes en las épocas de invierno y primavera-verano. Las pruebas de diferencias en las medias de volumen normalizado para cada intervalo de tamaño, tomando en cuenta que las varianzas son diferentes, se muestran en la Tabla 5.12.

**Tabla 5.12 Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras de invierno y primavera-verano en Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-4.64	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	10.74	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-14.70	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-4.65	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	6.55	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Primavera-Verano.

En la tabla 5.12, los valores p obtenidos de las pruebas para los distintos intervalos de tamaño muestran que no hay una relación entre las muestras de datos obtenidas en invierno con las que corresponden al monitoreo de primavera-verano. Existe suficiente evidencia estadística de que las muestras son distintas para todos los intervalos de tamaño. Por lo

anterior concluimos que son necesarios muestreos en distintas épocas para caracterizar físicamente de manera correcta esta región del área metropolitana. La siguiente comparación es sobre los valores de las medias y varianzas de las fracciones de volumen normalizadas calculadas con los datos obtenidos en las épocas de primavera-verano y otoño del año 2005. Las medias y varianzas se muestran en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de primavera-verano y otoño en Santa Catarina.**

Época	Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Medias y varianzas
Primavera-Verano Otoño	0.3 - 0.5	$\mu_1 = 0.09082$ $\sigma_1 = 0.05618$ $\mu_2 = 0.15757$ $\sigma_2 = 0.07141$
Primavera-Verano Otoño	0.5 - 1.0	$\mu_1 = 0.05017$ $\sigma_1 = 0.02835$ $\mu_2 = 0.14698$ $\sigma_2 = 0.07041$
Primavera-Verano Otoño	1.0 - 2.5	$\mu_1 = 0.10043$ $\sigma_1 = 0.02228$ $\mu_2 = 0.16589$ $\sigma_2 = 0.02976$
Primavera-Verano Otoño	2.5 - 5.0	$\mu_1 = 0.31865$ $\sigma_1 = 0.04795$ $\mu_2 = 0.42290$ $\sigma_2 = 0.08198$
Primavera-Verano Otoño	5.0 - 10.0	$\mu_1 = 0.43993$ $\sigma_1 = 0.05842$ $\mu_2 = 0.10666$ $\sigma_2 = 0.03209$

(1) Primavera-Verano, (2) Otoño.

**Prueba de igualdad de varianzas en el Sitio 2 (primavera-verano y otoño). Prueba de Fisher.**

Los resultados de la prueba de diferencia en las varianzas de las fracciones de volumen de los datos de los monitoreos de primavera-verano y otoño en la preparatoria Tec Campus Santa Catarina, se muestran en la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14 Resultados de la prueba de diferencia en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de primavera-verano y otoño en Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de varianza			
	Hipótesis	Valor F	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.62	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.16	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.56	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.34	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	3.32	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Primavera-Verano, (2) Otoño.

Los valores p de la Tabla 5.14 indican que las varianzas de cada intervalo de tamaño de partícula son diferentes entre la época de primavera-verano (14 al 23 de Junio) y la de otoño (2 al 14 de Noviembre). Esta misma conclusión se obtuvo de los análisis anteriores para otoño y primavera-verano.

En la siguiente sección se hace una prueba de hipótesis sobre las medias para el caso de que las varianzas de las muestras son distintas.

**Prueba de diferencia en las medias en el Sitio 2 (primavera-verano y otoño). Prueba t.**

Al igual que en los casos anteriores, las medias de las fracciones de volumen de los periodos de primavera-verano y otoño se analizan mediante una prueba t para saber si hay diferencia en las medias de las muestras. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 5.15.

**Tabla 5.15 Resultados de la prueba de diferencias en las medias aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de primavera-verano y otoño de Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	16.46	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-27.06	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-39.25	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-23.88	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	124.00	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Primavera-Verano, (2) Otoño.

De los valores de p se concluye que las medias de las muestras de datos obtenidos en primavera-verano y otoño en la misma zona son diferentes para todos los intervalos de tamaño. Por lo anterior, concluimos que hay evidencia estadística de que las distribuciones de tamaño de aerosoles son diferentes en primavera-verano y otoño en Santa Catarina.

**Tabla 5.16 Medias y varianzas de las fracciones de volumen de los monitoreos de invierno y otoño en Santa Catarina.**

Época	Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Medias y varianzas
Invierno Otoño	0.3 - 0.5	$\mu_1 = 0.07772$ $\sigma_1 = 0.04819$ $\mu_2 = 0.15757$ $\sigma_2 = 0.07141$
Invierno Otoño	0.5 - 1.0	$\mu_1 = 0.07388$ $\sigma_1 = 0.04948$ $\mu_2 = 0.14698$ $\sigma_2 = 0.07041$
Invierno Otoño	1.0 - 2.5	$\mu_1 = 0.08515$ $\sigma_1 = 0.01581$ $\mu_2 = 0.16589$ $\sigma_2 = 0.02976$
Invierno Otoño	2.5 - 5.0	$\mu_1 = 0.30421$ $\sigma_1 = 0.06484$ $\mu_2 = 0.42290$ $\sigma_2 = 0.08198$
Invierno Otoño	5.0 - 10.0	$\mu_1 = 0.45903$ $\sigma_1 = 0.04925$ $\mu_2 = 0.10666$ $\sigma_2 = 0.03209$

(1) Invierno, (2) Otoño.

Las medias y varianzas de las fracciones de volumen de los diferentes intervalos de tamaño de los monitoreos se muestran en la Tabla 5.16.

**Prueba de igualdad de varianzas en el Sitio 2 (invierno y otoño). Prueba de Fisher.**

Los resultados de las pruebas de diferencia en las varianzas se muestran en la Tabla 5.17. Los resultados indican que las varianzas de las fracciones de volumen de invierno y otoño son diferentes para todos los intervalos de tamaño, al igual que en los casos anteriores.

**Tabla 5.17 Resultados de la prueba de diferencia en las varianzas aplicada a las muestras obtenidas de los monitores de invierno y otoño en Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [µm]	Prueba de varianza			
	Hipótesis	Valor F	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.46	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.49	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.28	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0.63	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ $H_1 \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	2.36	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Otoño.

**Prueba de diferencia en las medias en el Sitio 2 (invierno y otoño). Prueba t.**

Los resultados de las pruebas de hipótesis sobre las medias de las fracciones de volumen de los diferentes tamaños se muestran en la Tabla 5.18. Los valores de p indican que las medias son diferentes para todos los intervalos de tamaño para los monitoreos de invierno y de otoño.

**Tabla 5.18 Resultados de la prueba de hipótesis sobre las medias aplicada a las muestras obtenidas de los monitoreos de invierno y otoño en Santa Catarina.**

Intervalo de diámetro de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Prueba de hipótesis sobre las medias.			
	Hipótesis	Valor t	Valor p	Conclusión
0.3 - 0.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-20.25	0.00	Se rechaza $H_0$
0.5 - 1.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-18.62	0.00	Se rechaza $H_0$
1.0 - 2.5	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-51.42	0.00	Se rechaza $H_0$
2.5 - 5.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	-25.17	0.00	Se rechaza $H_0$
5.0 - 10.0	$H_0 \mu_1 = \mu_2$ $H_1 \mu_1 \neq \mu_2$	142.31	0.00	Se rechaza $H_0$

(1) Invierno, (2) Otoño.

Los análisis estadísticos sobre las medias y varianzas de las fracciones de volumen para los distintos intervalos de tamaño de partículas indican que las distribuciones son diferentes para las distintas épocas del año y sitios evaluados. Por lo anterior, la evidencia

estadística indica que para caracterizar las distribuciones de tamaño de  $PM_{10}$ , es necesario monitorear por zona del AMM. Solamente en un caso (Tabla 5.3) de 30 comparaciones en el intervalo de partículas de 1.0 a 2.5  $\mu m$  el valor p de 0.59 indica que las medias de fracción de volumen de este intervalo son iguales tanto en el sitio de muestreo en el sur del AMM como en Santa Catarina en la época de invierno.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los datos de distribución de tamaños muestran que se encuentran en mayor cantidad las partículas del intervalo más pequeño (0.3 – 0.5  $\mu\text{m}$ ) seguidas, decreciendo monótonicamente en número, de las partículas más grandes, hasta llegar al intervalo mayor de 5.0 a 10.0  $\mu\text{m}$ . Esto es consistente con otros estudios de aerosoles típicos de zonas urbanas. Con respecto al volumen de partículas de cada intervalo se observa lo contrario. Las partículas de mayor tamaño representan la mayor fracción de volumen, disminuyendo monótonicamente con el intervalo de tamaño. Solamente se encontró que en la época de otoño la fracción de volumen de partículas comprendidas en el intervalo de 2.5 a 5.0  $\mu\text{m}$  fue mayor a la fracción entre 5.0 y 10.0  $\mu\text{m}$ . No se tiene una explicación de este cambio, pues típicamente la fracción de volumen aumenta con el intervalo de tamaño de  $\text{PM}_{10}$ . Es conveniente hacer estudios posteriores para determinar una posible causa de este cambio, o bien, determinar si fue un caso excepcional.

El análisis estadístico aplicado a los datos de fracciones de volumen calculados en los dos sitios de monitoreo y en las distintas épocas del año indica que las medias y varianzas de todas las distribuciones de fracción de volumen fueron diferentes en todas las épocas y entre sitios para cada uno de los intervalos de tamaño. Por lo tanto, podemos concluir que es necesario hacer monitoreos en diferentes sitios del AMM y en diferentes épocas del año para determinar la variabilidad espacial y estacional de los diferentes tamaños de partícula que conforman el  $\text{PM}_{10}$  en el AMM.

No fue posible realizar adecuadamente la caracterización química de las muestras de  $\text{PM}_{2.5}$  obtenidas en los tres monitoreos. Se buscó determinar la concentración de 16 diferentes hidrocarburos, pero la cantidad de la muestra en cada filtro resultó ser menor del límite de detección del cromatógrafo. Este problema puede solucionarse en monitoreos futuros al capturar una muestra mayor de  $\text{PM}_{2.5}$  o de  $\text{PM}_{10}$  para su análisis. También es recomendable utilizar equipos y métodos de análisis que permitan tener límites menores de detección de hidrocarburos adsorbidos en partículas.

Las pruebas toxicológicas realizadas en la UNAM a muestras de  $PM_{10}$  obtenidas en el monitoreo de otoño en Santa Catarina deben tomarse con reserva y solo como indicios de la posible toxicidad de las partículas del AMM. Es conveniente realizar un estudio enfocado a determinar la toxicidad y como se compara con muestras de la Ciudad de México para poder llegar a conclusiones con justificación estadística. Los resultados del análisis de las muestras mostraron que los compuestos presentes en el  $PM_{10}$  inducen muerte celular tanto de fibroblastos como de glóbulos rojos.

Por último, es recomendable investigar la relación que tienen los datos de concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  con la incidencia de enfermedades respiratorias y degenerativas asociadas en los distintos sectores de la población y en cada una de las zonas de muestreo seleccionadas. De esta forma, se podrán estimar los beneficios de reducir los riesgos por exposición de la población a partículas y otros contaminantes atmosféricos en el AMM.

## REFERENCIAS

ARTIÑANO, Begonia; Pedro Salvador, Diana G. Alonso, Xavier Querol, Andrés Alastuey. (2003) “*Anthropogenic and natural influence on the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes*”. Environmental Pollution. 125:453-465.

CHOW C. Judith, John Watson, Sylvia A. Edgerton, Elizabeth Vega y Elba Ortiz. “*Spatial differences in outdoor PM<sub>10</sub> mass and aerosol composition in Mexico City.*” Journal of the Air & Waste Management Association. Abril, 2002.

CICERO-Fernández, Pablo; Víctor Torres, Alberto Rosales, Herman César, Kees Dorland, Roberto Muñoz, Ricardo Uribe y Patricia Martínez. “*Evaluation of human exposure to ambient PM<sub>10</sub> in the metropolitan area of Mexico City using a GIS-Based methodology.*” Journal of the Air & Waste Management Association. Noviembre, 2001.

COHEN, David; David Garton, Eduard Stelcer, Tao Wang, Steven Poon, Jiyong Kim, Sung Nam Oh, Hye-Joung –Shin, Mi Young Ko, Flora Santos, Lutz Esquerra, Voung thu Bac, Pham D. Hien, Mitsuo Uematsu. (2002) “*Characterisation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> fine particle pollution in several Asian regions.*” 16<sup>th</sup> Int. Clean Air Conf. Agosto.

DEGAETANO, Arthur T. y Owen M. Doherty. “*Temporal, spatial and meteorological variations in hourly PM<sub>2.5</sub> concentration extremes in New York city.*” Atmospheric Environment 38:1547-1558. Diciembre 2004.

GOMEZ-Perales J. E., R. N. Colvile, M. J. Nieuwenhuijsen, A. Fernández-Bremauntz, V. J. Gutiérrez-Avedoy, V. H. Páramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez, E. Bueno-López, F. Mandujano, R. Bernabé-Cabanillas y E. Ortiz-Segovia. “*Commuters’ exposure to PM2.5, CO, y benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico city.*” *Atmospheric Environment* 38:1219-1229, Noviembre, 2004.

HAZENKAMP-VON Arx, Marianne E.; Thomas Götschi Fellmann, Lucy Oglesby, Ursula Ackermann-Liebrich, Thórarinn Gíslason, Joachim Heinrich, Deborah Jarvis, Christina Luczynska, Angeles Jaén Manzanera, Lars Modig, Dan Norbäck, Annette Pfeifer, Albino Poli, Michela Ponzio, Argo Soon, Paul Vermeire y Nino Künzil. “*PM2.5 assessment in 21 European Study Centers of ECRHS II: method and first winter resultus.*” *Journal of the Air & Waste Management Association*. 53:617-628, Mayo 2003.

JIMÉNEZ, Cisneros Blanca Elena. “*La contaminación ambiental en México.*” Editorial Limusa. México, 2001.

KAVOURAS, Ilias G., Petros Koutrakis, Francisco Cereceda-Balic, Pedro Oyola. “*Source apportionment of PM10 and PM2.5 in five Chilean cities using factor analysis.*” *Journal of the Air & Waste Management Association*. 51:451-464. Marzo, 2001.

KIM, Eugene, Philip K. Hopke, Joseph P. Pinto y William E. Wilson. “*Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St. Louis.*” *Environmental Science & Technology*. 39:4172-4179. 2005.

McDONALD, Jacob D.; Barbara Zielinska, Eric M. Fujita, John C. Sagebiel, Judith C. Chow, John G. Watson. "*Emissions from charboiling and grilling of chicken and beef.*" Journal of the Air & Waste Management Association. Febrero, 2003.

OSORNIO-Vargas, A. R.; James C. Bonner, Ernesto Alfaro-Moreno, Leticia Martínez, Claudia García-Cuella, Sergio Ponce-de-León Rosales, Javier Miranda e Irma Rosas. "*Proinflammatory and cytotoxic effects of Mexico city air pollution particulate matter in vitro are dependent of particle size and composition.*" Environmental Health Perspectives. 111:1289-1293. 2003.

PINTO, Joseph P.; Allen S. Lefohn, Douglas S. Shadwick. "*Spatial variability of PM<sub>2.5</sub> in the United States.*" Journal of the Air & Waste Management Association. Abril, 2004.

QUEROL, X.; A. Alastuey, C. R. Ruiz, B. Artiñano, H. C. Hansson, R. M. Harrison, E. Buringh, H. M. ten Brink, M. Lutz, P. Bruckmann, P. Straehl, J. Schneider. "*Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities.*" Atmospheric Environment. 38:6547:6555. 2004.

RIVERA Vallejo, Claudia Cecilia. "*Distribución másica de las PM<sub>10</sub> en el área metropolitana de Monterrey.*" Tesis de maestría ITESM. Mayo, 2001.

SEINFELD, J. y Spyros N. Pandis. "*Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*". John Wiley and sons Inc. 1998.

STRAUSS W.; Mainwaring S.J. *“Contaminación del aire. Causas, efectos y soluciones.”* Editorial Trillas. Septiembre, 1990.

TSAPAKIS, Manolis; Evaggelia Lagoudaki, Euripides G. Stephanou, Ilias G. Kavouras, Petros Koutrakis, Pedro Oyola y Dietrich von Baer. *“The composition and sources of PM2.5 organic aerosol in two urban areas of Chile.”* Atmospheric Environment 36:3851-3863. Marzo 2002.

VEGA, Elizabeth; Elizabeth Reyes, Hugo Ruiz, José García, Gabriela Sánchez, Gerardo Martínez-Villa y Uriel González. *“Analysis of PM2.5 y PM10 in the atmosphere of Mexico city during 2000-2002.”* Journal of the Air & Waste Management Association. 54:786-798. Julio, 2004.

VUKOVICH, Fred M.; John Sherwell. *“Comparison of fine particles and the relationship between particle variations and meteorology at an urban site and a remote site in the Eastern United States.”* Journal of the Air & Waste Management Association. 52:573-584. Mayo, 2002.

WALSH, Kenneth; John Sherwell. *“Estimation of ambient PM2.5 concentrations in Maryland and verification by measured values.”* Journal of the Air & Waste Management Association. 52:1161-1175 Octubre, 2002.

WARK, Kenneth; Cecil Warner. *“Contaminación del aire. Origen y control.”* Editorial Limusa. México, 2001.

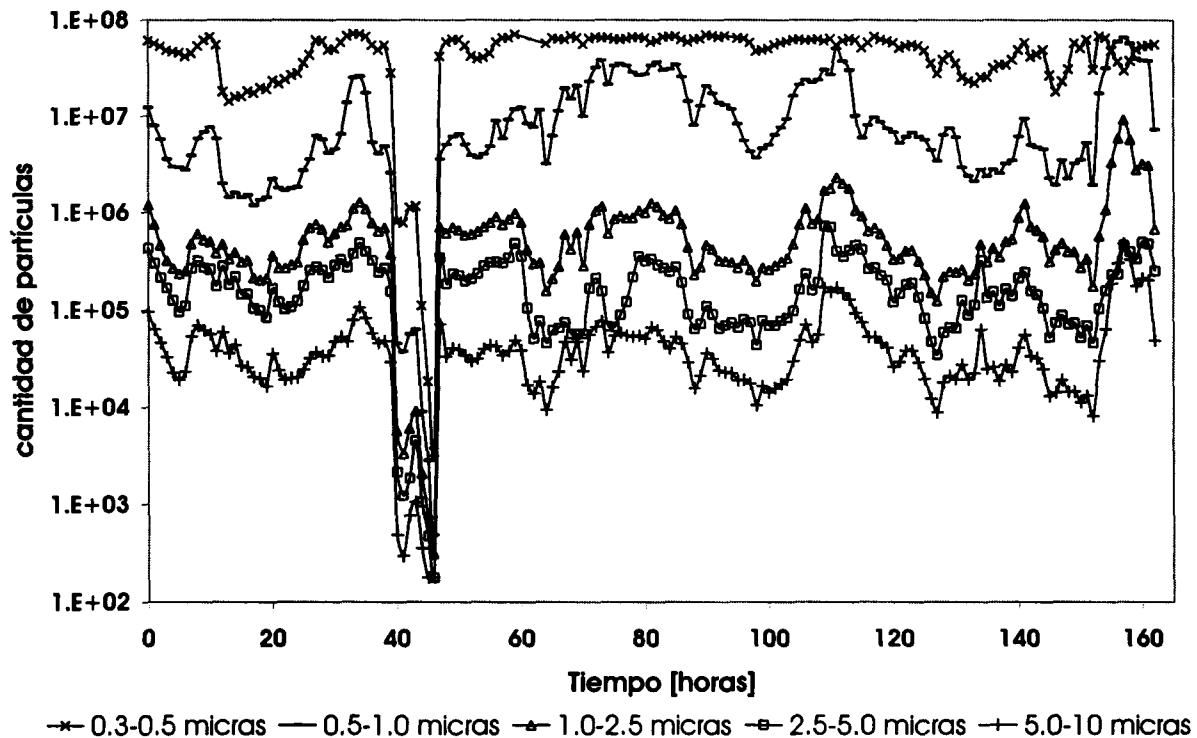
ZEREINI, Fathi; Friedrich Alt, Jürgen Messeirschmidt, Clare Wiseman, Ingo Feldmann, Alex Von Bohlen, Jürgen Müller, Karlheinz Lieb y Wildhelm Püttmann. "*Concentration and distribution of heavy metals in urban airborne particulate matter in Frankfurt am main, Germany*". Environmental Science and Techology. 39: 2983-2989, 2005.

## ANEXO A

### GRÁFICAS DE VALORES TOTALES DE CANTIDAD DE PM<sub>10</sub>.

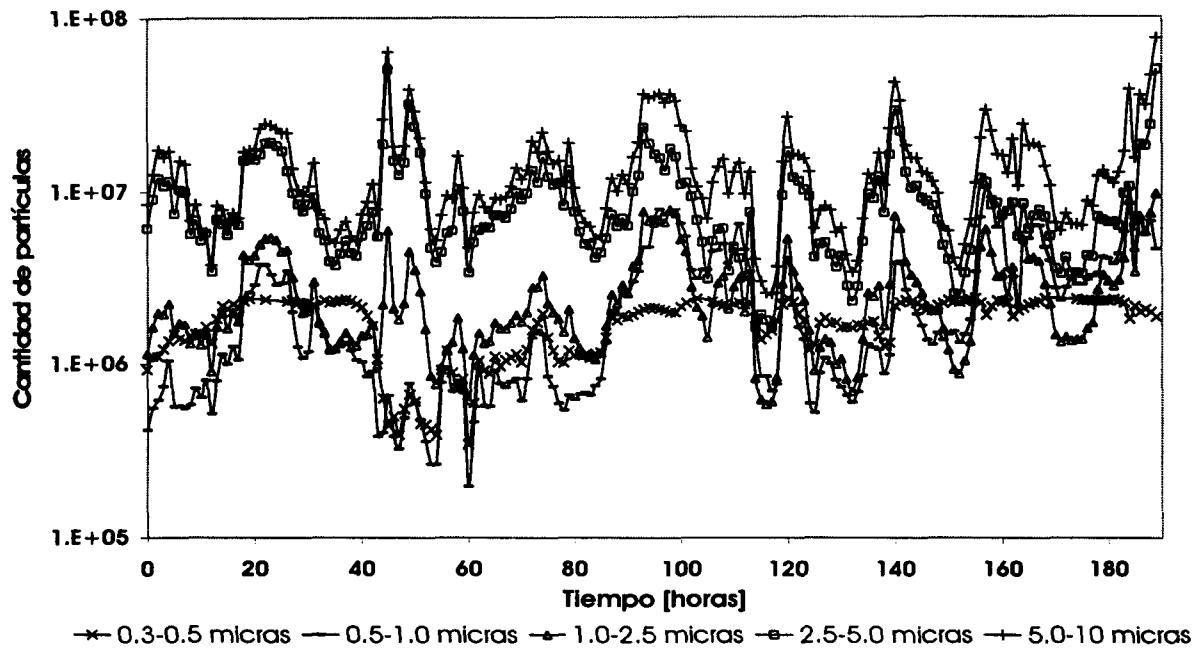
En este anexo se muestran las figuras que corresponden a las cantidades de PM<sub>10</sub> contadas por el equipo Climet durante los monitoreos de invierno, primavera-verano y otoño en los sitios del sur del AMM y Santa Catarina. Se ha decidido mostrar los valores en tiempo continuo desde el inicio hasta el fin de cada periodo de monitoreo en cada sitio ya que en el Capítulo IV se mostraron los valores promedio de las fracciones de cantidad promediados en cada hora del día.

Para facilitar la visualización de las curvas de cada intervalo de tamaño, debido a los órdenes de magnitud tan grandes entre los valores de las partículas más finas y las más gruesas, se emplea la escala logarítmica en cada una de las gráficas.

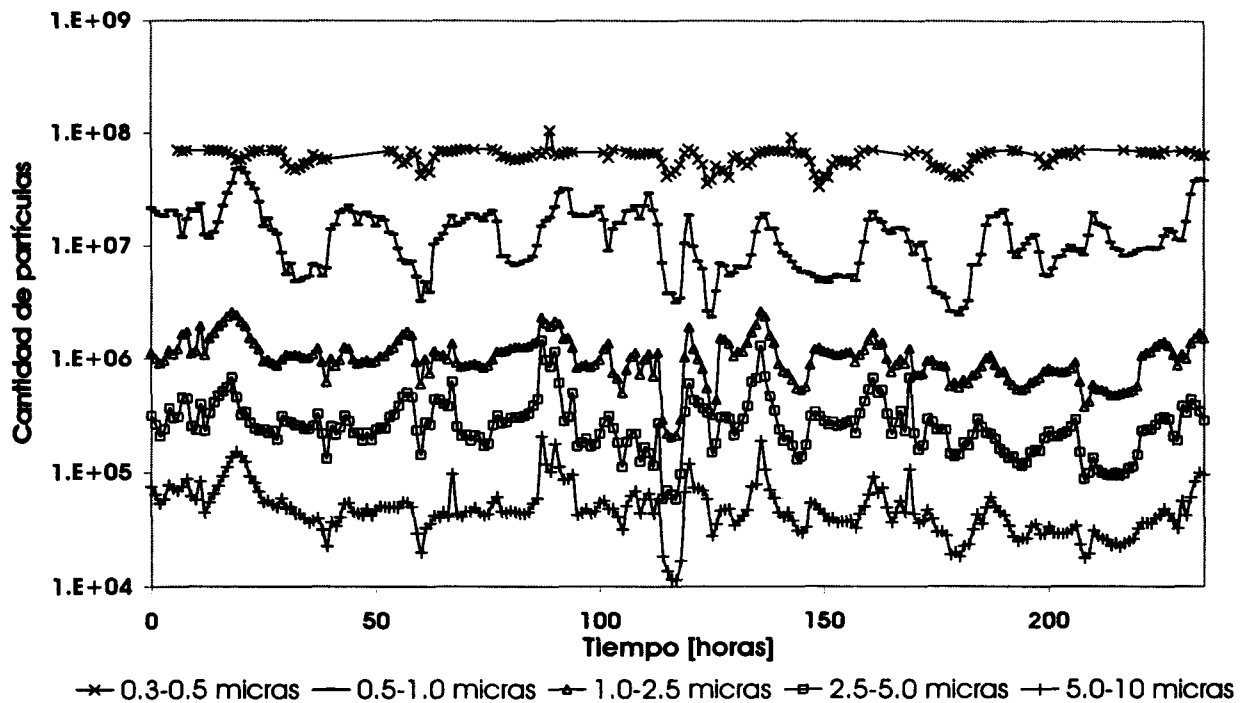


**Figura A.1** Cantidades totales de PM<sub>10</sub> contadas con el Climet durante el monitoreo de invierno en el sur del AMM.

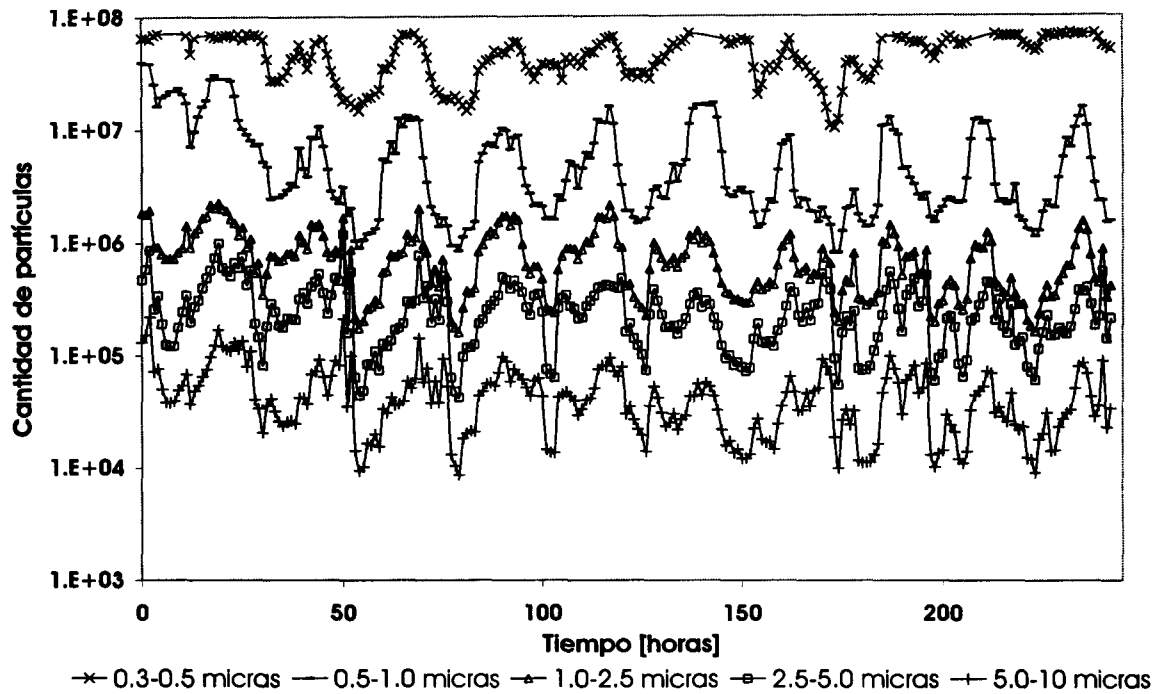




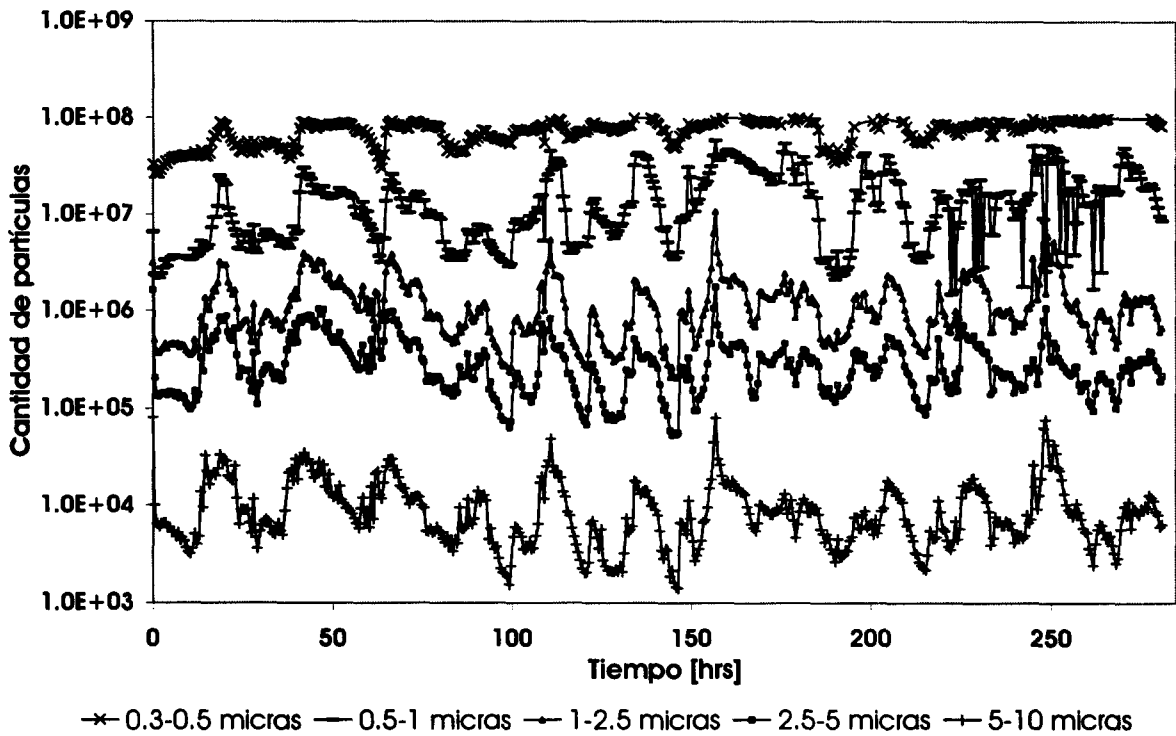
**Figura A.2** Cantidades totales de  $PM_{10}$  contadas con el Climet durante el monitoreo de invierno en Santa Catarina.



**Figura A.3** Cantidades totales de  $PM_{10}$  contadas con el Climet durante el monitoreo de primavera-verano en el sur del AMM.



**Figura A.4** Cantidades totales de PM<sub>10</sub> contadas con el Climet durante el monitoreo de primavera-verano en Santa Catarina.



**Figura A.5** Cantidades totales de PM<sub>10</sub> contadas con el Climet durante el monitoreo de otoño en Santa Catarina.

## ANEXO B

### CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y TOXICOLÓGICA

En este capítulo se presentan los resultados del análisis químico y toxicológico efectuado a los filtros recuperados de los monitoreos realizados en cada uno de los sitios de monitoreo y en las distintas épocas del año. El método de análisis químico se describe en el Capítulo 3.

#### **B.1 Resultados de la caracterización química.**

Los filtros recuperados durante los monitoreos de invierno, primavera-verano y otoño tanto en el sitio del sur de Monterrey como en el de Santa Catarina fueron analizados químicamente mediante la técnica de HPLC. En total se analizaron 42 muestras obtenidas en las 3 campañas de monitoreo: 11 correspondientes a la campaña de invierno, 21 de la campaña de primavera-verano y 10 de la campaña de otoño. Esta última solo se realizó en las instalaciones de la preparatoria del Tecnológico de Monterrey ubicada en Santa Catarina.

En total se analizaron 16 hidrocarburos mediante el método EPA 8270/1994. No fue posible cuantificarlos adecuadamente debido a que la cantidad de la muestra fue pequeña y con un contenido de hidrocarburos inferior al límite de detección. El listado de estos compuestos para cada época de monitoreo se muestra en la Tabla B.1, en la cual también se muestra que las cantidades detectadas son inferiores al límite de detección del equipo.

Las razones por las cuales no se pudo cuantificar cada especie puede deberse principalmente a 3 factores. El primero de ellos puede ser que el equipo utilizado, Partisol plus 2025, no es de alto volumen y las cantidades de las muestras recuperadas no son suficientes como para que el detector del equipo HPLC las determine en cantidades significativas para la sensibilidad de este equipo. El segundo es que debe tomarse en cuenta el método empleado para determinar los PAHs. Según el reporte entregado por el laboratorio, el método utilizado es el EPA 8270/1994 el cual podría no resultar adecuado para la cuantificación de las especies

contenidas en la muestra tomando en cuenta el equipo que se utilizó para obtener estas muestras.

**Tabla B.1 Hidrocarburos poliaromáticos detectados en las muestras recuperadas en cada monitoreo durante las 3 épocas de análisis.**

Hidrocarburo	Invierno	Primavera-Verano	Otoño
Naftaleno	< 0.3 mg/Kg (ppm)	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Acenaftileno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Acenafteno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Fluoreno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Fenantreno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Antraceno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Fluoranteno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Pireno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Criseno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Benzo-perileno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Indeno-pireno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Benzo[A] Antraceno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Benzo[B] Fluoranteno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Benzo[K] Fluoranteno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Benzo[A] Pireno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm
Dibenzo[A, H] Antraceno	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm	< 0.3 ppm

El tercer factor es que se debe considerar la localización del equipo en estudios donde el objetivo es cuantificar las especies de HPAs que se adsorben en las PM<sub>2.5</sub>. Los equipos donde se colecta la muestra se localizan en puntos donde el tráfico es constante y muy cargado, como pueden ser las avenidas principales de una ciudad. Además que en muchos de estos trabajos se usa un muestreador de alto volumen para tomar las muestras. En nuestro caso, el objetivo principal del estudio era caracterizar las PM<sub>10</sub> en sitios típicos, sin influencia importante del tráfico vehicular. En un estudio posterior, se puede hacer una evaluación de

distribución de tamaño y composición química del  $PM_{10}/PM_{2.5}$  en zonas de alta influencia de tráfico o de fuentes importantes de estos contaminantes.

## B.2 Resultados de la caracterización toxicológica.

Para evaluar la toxicidad de las partículas se enviaron 3 muestras al Departamento de Salud Ambiental de la UNAM, donde se han desarrollado metodologías y técnicas de análisis de toxicidad. Las muestras de  $PM_{10}$  se compararon con muestras de  $PM_{10}$  de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). EL objetivo es hacer una evaluación preliminar de la toxicidad de las  $PM_{10}$  del AMM. Los resultados de la incubación de fibroblastos con muestras de  $PM_{10}$  obtenidas en el AMM y en la ZMVM indican que ambas partículas inducen muerte celular. La pérdida de las células fue determinada por el método del cristal violeta. Como muestra la Figura B.1, el efecto nocivo de las  $PM_{10}$  colectadas en Monterrey es mayor al de las  $PM_{10}$  de la Ciudad de México.

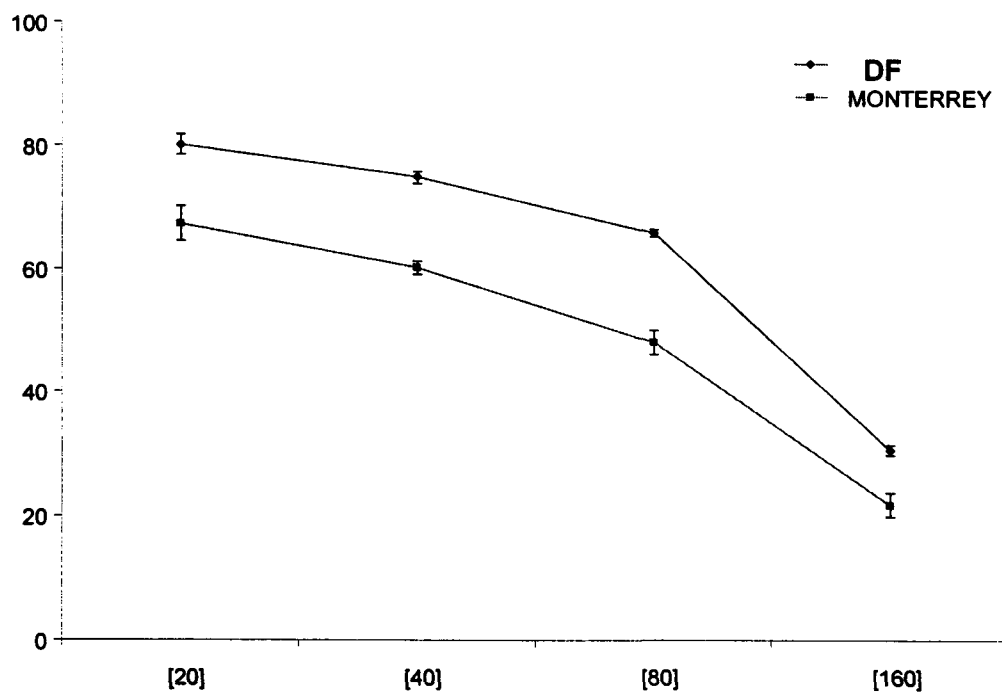
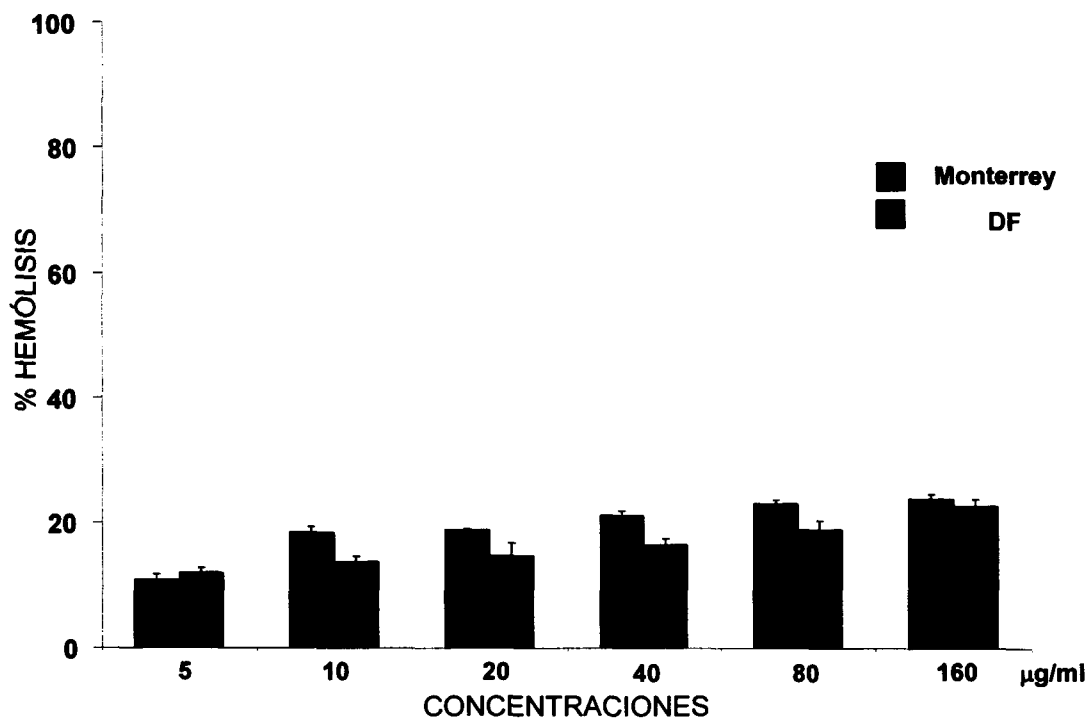


Figura B.1 Pérdida de células expuestas a  $PM_{10}$  de la ZMVM y del AMM.

Otra manera de evaluar el efecto de las partículas es incubándolas con glóbulos rojos. Cuando los componentes de las partículas, generalmente compuestos inorgánicos del suelo,

interactúan con la membrana de los glóbulos rojos, estos se rompen. A este fenómeno se le llama hemólisis. Como muestra la Figura B.2, ninguna de las dos muestras tiene un efecto muy notable, especialmente al considerar que las partículas como cuarzo o asbesto inducen grados de hemólisis hasta del 100%. Estos resultados sugieren que en ninguna de las muestras hay un componente inorgánico del suelo que tenga efecto sobre los glóbulos rojos. Una consideración con este tipo de muestras es que la fibra de vidrio de los filtros pueda contaminar la muestra. Como la fibra de vidrio induce hemólisis, estos resultados indican que de haber contaminación, sería menor y comparable para ambas muestras.



**Figura B.2** Porcentaje de hemólisis en eritrocitos expuestos a  $PM_{10}$  de Ciudad de México y Monterrey.

Las muestras de DNA de fibroblastos expuestas a las  $PM_{10}$ , tanto de Monterrey como de Ciudad de México, fueron degradadas siguiendo un patrón indicativo de que al aumentar la concentración de las partículas el porcentaje de DNA degradado aumenta. Los resultados de esta prueba de toxicidad solo nos dan una idea del potencial toxico de las partículas del AMM.

En estudios futuros se puede enfocar en evaluar la toxicidad de las  $PM_{10}$  con un mayor número de muestras que permita tener una mayor evidencia de su toxicidad.

