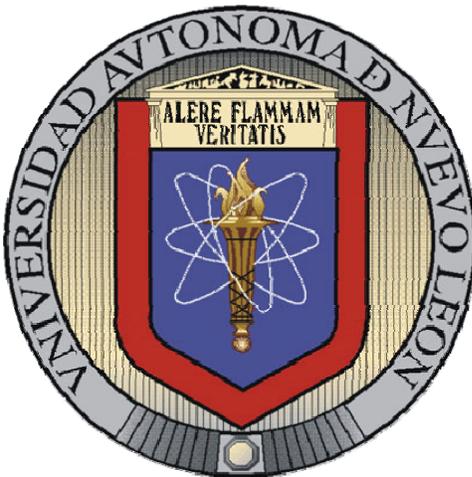


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE MEDICINA**  
**Subdirección de Posgrado**



**Determinación del contenido de PAH's en  
partículas  $PM_{2.5}$  en una zona de alto tráfico  
vehicular y otra con potencial exposición  
industrial del Área Metropolitana de Monterrey**

**TESIS**

**Que para obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS con  
orientación terminal en Farmacología y Toxicología Presenta:**

**Q.F.B. OMAR GONZÁLEZ SANTIAGO**

**Agosto 2009**

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE PAH's EN LAS PARTICULAS  
PM2.5 DE UNA ZONA CON ALTO TRAFICO VEHICULAR Y OTRA CON  
POTENCIAL EXPOSICIÓN INDUSTRIAL DEL AREA METROPOLITANA  
DE MONTERREY**

**Aprobación de la Tesis:**

---

**Dr. med. LOURDES GARZA OCAÑAS**  
Director de Tesis

---

**Dr. med. JUAN ANTONIO CUELLAR LOPEZ**  
Co-Director de Tesis

---

**Dr. med. MIGUEL REYES AMEZCUA**  
Comisión de Tesis

---

**Dr. C. RUBEN LUJAN RANGEL**  
Comisión de Tesis

---

**Dr. Ing. BENJAMIN LIMON**  
Comisión de Tesis

---

**Dr. DIONICIO A. GALARZA DELGADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado

## INDICE

Capitulo

<b>1.- Introducción.</b>	1
Objetivo	19
Objetivos específicos	19
<b>2.- Material y métodos</b>	20
2.1.- Material	20
2.1.1. Equipos	20
2.1.2. Reactivos.	21
2.2.- Métodos.	22
Obtención de muestras PM2.5.	22
Validación del método analítico para la cuantificación de PAH's.	28
Análisis cuantitativo de PAH's en las muestras PM2.5.	40
<b>3.- Resultados.</b>	43
<b>4.- Discusión</b>	75
<b>5.- Conclusiones</b>	81
Bibliografía	83
Anexos	89

## LISTA DE TABLAS

## LISTA DE FIGURAS

Figura	
1.1.- Partículas ambientales. Tomado de Ulrich <i>et.al.</i>	4
1.2.- Tamaño comparativo de las partículas ambientales. Tomado de EPA.	6
1.3.- Niveles de penetración pulmonar del material particulado.	8
1.4.- 17 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos que recomienda la EPA monitorear continuamente.	12
1.5.- Ubicación del Área Metropolitana de Monterrey.	14
1.6.- Cerro de la Silla visto desde la azotea del edificio de cardiología de la Facultad de Medicina UANL.	15
1.7.- Estaciones de monitoreo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental en el Área Metropolitana de Monterrey.	16
2.1.- Muestreador de alto volumen (TISH <sup>®</sup> environmental)	22
2.2.- Red del SIMA. Área Metropolitana de Monterrey.	24
2.3.- Envoltura de filtros en papel aluminio previa inspección visual.	25
2.4.- Colocación de filtro en equipo Hi-Vol.	26
2.5.- Filtro doblado con partículas PM2.5.	27
3.1.- Niveles PM2.5 por fecha de muestreo (65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es el limite máximo una vez al año permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993)	46
3.2.- Niveles de PM2.5 como promedio mensual (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es el limite promedio anual permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993).	47

3.3.2.- Niveles de PAH's totales durante el periodo de muestreo.	65
3.3.3. Niveles de PAH's en ambas zonas.	66
3.3.4. Serie temporal de B(a)A, Criseno y B(b)F en ambas zonas	67
Figura 3.3.5. Serie temporal de B(k)F, B(a)P y B(ghi)P en ambas zonas	68
Figura 3.3.6. Serie temporal de B(a)P <sub>eq</sub> en ambas zonas.	73

## Lista de Tablas

Tabla 2.1.- Factores de equivalencia toxica (TEF's) para PAH's.	41
Tabla 2.2 Radios diagnósticos para emisiones de PAH's	41
Tabla 3.1.1- Estadística descriptiva de PM2.5	44
Tabla 3.1.2.- Niveles de PM2.5 por zona y fecha de muestreo	45
Tabla 3.1.3 Correlación PM2.5 vs variables meteorológicas	50
Tabla 3.2.1.- Programa final de fluorescencia para la determinación de PAH's.	52
Tabla 3.2.2 Resultados de la evaluación de linealidad del sistema	53
Tabla 3.2.3 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud instrumental.	54
Tabla 3.2.4 Resultados de límite de detección y límite de cuantificación del sistema	55
Tabla 3.2.5 Resultados de la evaluación linealidad del método	56
Tabla 3.2.6 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud del método a condiciones de repetibilidad	57

Tabla 3.2.7 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud a condiciones de repetibilidad.	58
Tabla 3.2.8 Resultados de la evaluación de exactitud como porcentaje de recuperación.	59
Tabla 3.2.9 Resultados de la evaluación del límite de detección y cuantificación del método.	60
Tabla 3.3.1.- Principales PAH's encontrados en las muestras de partículas PM2.5	61
Tabla 3.3.2.- Niveles de PAH's en las partículas PM2.5 zona 1 (ng/m <sup>3</sup> )	63
Tabla 3.3.3.- Niveles de PAH's en las partículas PM2.5 de la zona 2 (ng/m <sup>3</sup> )	64
Tabla 3.3.4. Estadística descriptiva PAH's totales.	65
Tabla 3.3.2. Promedio mensual de cada PAH's (ng/m <sup>3</sup> ) cuantificado en la zona 2.	69
Tabla 3.3.3. Promedio mensual (ng/m <sup>3</sup> ) de cada PAH's cuantificado en la zona 2	70
Tabla 3.3.6 Resultados de B(a)P <sub>eq</sub> Zona 1	72
Tabla 3.3.7. Resultados de B(a)P <sub>eq</sub> Zona 2	72
Tabla 3.3.8 Resultados de los radios diagnósticos para emisiones de PAH's.	74

## ABREVIATURAS

PAH's	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
PM2.5	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras
PM10	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras
PST	Partículas suspendidas totales
HPLC	Cromatógrafo de líquidos de alta resolución
LOD	Límite de detección
LOQ	Límite de cuantificación
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
EPA	Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos
B(a)P	Benzo(a)Pireno
B(a)P <sub>eq</sub>	Equivalentes de Benzo(a)Pireno
B(ghi)P	Benzo(ghi)Perileno
B(k)F	Benzo(k)Fluoranteno
B(b)F	Benzo(b)Fluoranteno
SIMA	Sistema Integral de Monitoreo Ambiental
PTFE	Politetrafluoretileno
mL	Mililitros
CE	Centro
SO	Suroeste
µg/m <sup>3</sup>	microgramos por metro cúbico
ng/m <sup>3</sup>	nanogramos por metro cúbico

%DER	Porcentaje de desviación estándar relativa
DCM	Diclorometano
ACN	Acetonitrilo
μL	Microlitros
%E	Porcentaje de error
%R	Porcentaje de recuperación
S/N	Relación Señal/Ruido
Hi-Vol	Alto volumen
FR	Factor de respuesta
r	Coefficiente de correlación
SD	Desviación estandar
VOC's	Compuestos organicos volatiles
° C	Grados centígrados

# CAPITULO I

## 1.- Introducción

El medio ambiente comprende aquellos factores físicos y naturales que rodean e influyen de alguna manera en los seres vivos. En el caso de los seres humanos incluye también los factores sociales, económicos, culturales e históricos. Para sobrevivir, cada ser vivo necesita adaptarse o modificar el ambiente en el que se encuentra. El hombre desde los más remotos tiempos—como ha dicho Bronowsky— no ha sido sólo parte del paisaje, sino también su incansable y supremo modelador. Las sociedades que ha formado han dominado la naturaleza para someterla a su servicio, y con la explotación de sus recursos ha provocando la degradación del medio ambiente (1). Las pérdidas de suelos arables, el avance de la desertificación, la desaparición de las selvas tropicales, el agotamiento inminente de recursos no renovables, el desequilibrio rural-urbano, la extinción, cada vez mas grande de especies vegetales y animales, **el grado progresivo de contaminación del aire, del agua, de la tierra** son las manifestaciones de esta degradación. Un ambiente adecuado es esencial para la supervivencia de las especies, incluida la humana, por lo que es importante su conservación a través de un desarrollo sustentable.

## **1.1.- Contaminación**

La contaminación ambiental es el deterioro de la pureza de las sustancias que componen la biosfera es decir la parte de la tierra donde se desarrolla la vida (1). En ella se incluye a la litosfera (tierra), la hidrosfera (agua) y la atmosfera (aire). Una definición más completa considera la contaminación como la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias de dichos sustratos, por un tiempo suficiente, y bajo condiciones tales, que esas sustancias interfieren con la salud y la comodidad de las personas, dañan los recursos naturales o alteran el equilibrio ecológico de la zona (2). En el medio ambiente la contaminación se presenta en el suelo, agua y **el aire**.

### **Contaminación del aire.**

La contaminación del aire es el cambio en la composición normal de la atmósfera, la cual esta constituida principalmente por Nitrógeno 78.03 %, Oxigeno 20.99 %, Argón 0.94 %, CO<sub>2</sub> 0.035 %, Neón 0.0024 %, gases inertes 0.00005 %, oxido nitroso 0.000025 %, metano 0.00015, dióxido de nitrógeno 0.0000001 %, amoniaco 0.0000001 %, ozono 0.000002 % y monóxido de carbono 0.00001 (3).

Es importante señalar que la atmósfera nunca ha estado totalmente limpia pues la presencia de ciertas sustancias que son arrastradas por el aire, como polvos orgánicos, **material particulado**, núcleos de sal de mar, el metano generado por los pantanos, polen y bacterias han causado cierto grado de contaminación. Sin embargo la atmósfera tiene la capacidad de limpiarse a sí misma por acción natural mediante la lluvia y el viento. Los problemas de contaminación del aire se presentan cuando estos procesos naturales de limpieza se ven superados por el mayor número de fuentes emisoras.

### **1.2. Tipos de contaminación atmosférica.**

La contaminación atmosférica se divide en 2 tipos según los contaminantes que predominan en ella. Así tenemos la de tipo 1 en la que se encuentran dióxido de azufre y **partículas ambientales**. Este tipo de contaminación es característica de los países del este de Europa. La contaminación tipo 2 se encuentra en países industrializados con gran carga vehicular y contiene óxidos de nitrógeno, ozono, humo de tabaco, así como productos de la combustión completa e incompleta de gasolina,

### **1.3. Efectos globales de la contaminación atmosférica.**

Los efectos de la contaminación no se limitan al sitio de origen sino que se extiende a sitios remotos y se les conoce también como efectos macroambientales. Los más importantes son: calentamiento global o efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono, lluvia ácida y **alteraciones en la salud de las personas (4)**.

Los niveles elevados de contaminación del aire se han asociado claramente con efectos adversos a la salud, afectando principalmente a los pulmones y el corazón (cardiopulmonar).(5, 6) Las reacciones individuales a la contaminación dependen de diversos factores, entre los que destacan: 1) **el estado de salud y carga genética del individuo**, 2) **grado de exposición** y 3) **el tipo de contaminante (7)**. Destacan de manera importante en el tipo de contaminante las partículas ambientales quienes están asociadas a diversos efectos adversos en la salud.

## **2.- Partículas ambientales.**

Una partícula se define como la parte pequeña de algo, una sustancia un material etc. Las partículas ambientales no son entidades químicas específicas, sino una mezcla de partículas de diferentes fuentes, tamaño, composición y propiedades.

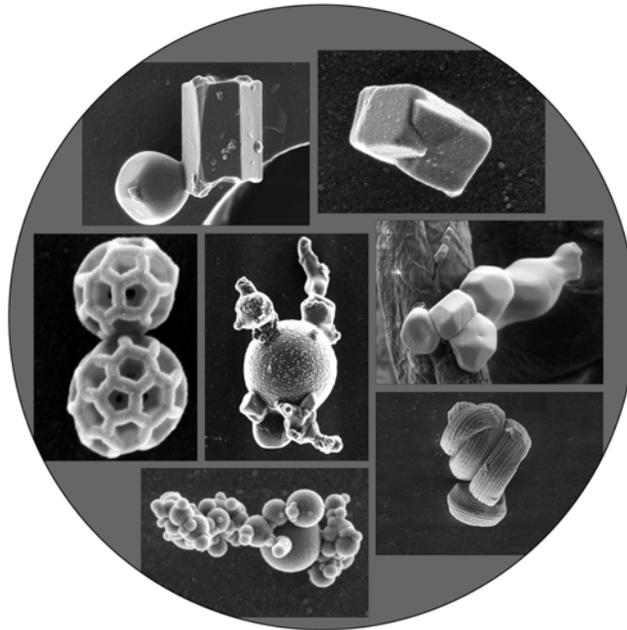


Figura 1.1.- Partículas ambientales. Tomado de Ulrich *et.al.* (23)

Dependiendo de la fuente de origen las partículas ambientales se clasifican como primarias y secundarias. Las primarias son aquellas que se emiten directamente de las fuentes como por ejemplo: materiales geológico y/o biológico suspendidos por el aire así como también productos de la combustión. Las partículas secundarias son formadas por medio de reacciones químicas en la atmósfera. En estas reacciones están involucrados; el oxígeno atmosférico, vapor de agua; especies reactivas como el ozono; radicales como el OH<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; contaminantes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y diversos gases orgánicos (8).

Otra clasificación de las partículas se basa en su diámetro aerodinámico. Así tenemos partículas gruesas ( $\leq 10\mu\text{m}$ ), finas ( $\leq 2.5\mu\text{m}$ ) y ultrafinas ( $\leq 0.1$

$\mu\text{m}$ ), siendo estas las mas estudiadas debido a sus efectos adversos en la salud.

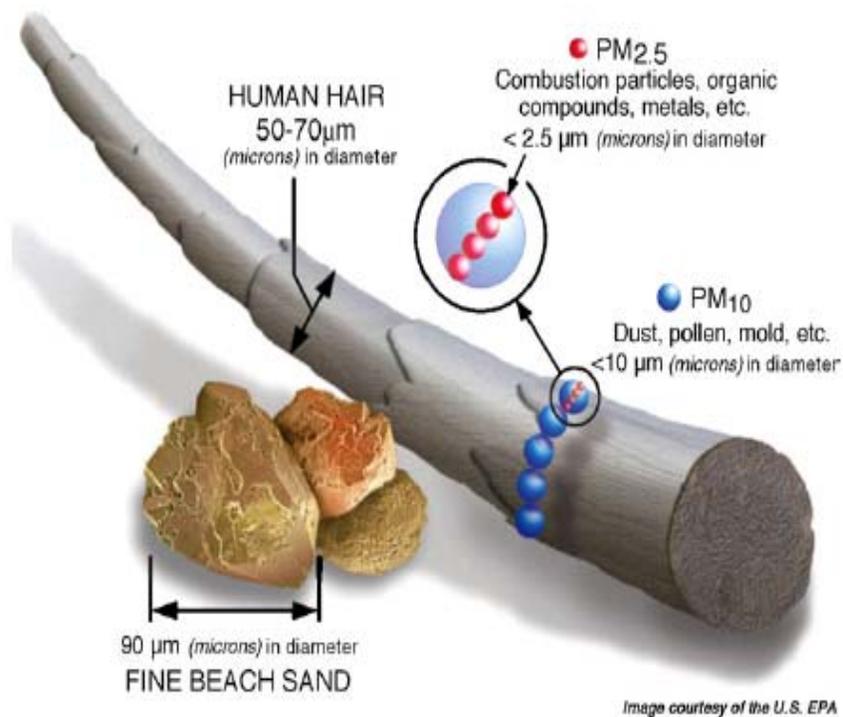


Figura 1.2.- Tamaño comparativo de las partículas ambientales. Tomado de EPA.

### 2.1. – Efecto de las partículas en la salud.

Las partículas ambientales tienen importantes efectos en la salud (9,10), ya sea a través de sus constituyentes principales o por el hecho de facilitar la

administración de contaminantes y agentes biológicos hacia el interior de los pulmones.

Estudios epidemiológicos, hechos en México y otros países del mundo, han encontrado asociación directa entre los niveles elevados de las partículas ambientales y un aumento en los efectos agudos de enfermedades respiratorias y cardiovascular [11 - 14]. **Recientes estudios reportan asociación entre la exposición a partículas ambientales y efectos sobre el desarrollo total o mortalidad neonatal [15 - 17].**

Los mecanismos biológicos causantes de los efectos adversos no se conocen con certeza . Los factores que influyen de manera importante al igual que con cualquier otro contaminante son: **Las características de la población, las características físicas y química de las partículas y la dosis de exposición.** A continuación se comenta brevemente cada uno de los factores.

### **2.1.1 Características de la población.**

Los efectos adversos causados por las partículas son variables y dependen de las características de la población estudiada. Los extremos de la vida como la infancia y vejez son los más afectadas por los elevados niveles de partículas. También lo es la preexistencia de ciertas enfermedades como EPOC, asma, diabetes e hipertensión.

## **Características de la partícula**

Entre las características de mayor riesgo de las partículas ambientales se encuentran las propiedades físicas (tamaño, número, área superficial), acidez ( $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ), componentes inorgánicos (óxidos y sales de metales), compuestos orgánicos (PAH y derivados, alérgenos y endotoxinas) e interacciones con otros contaminantes ( $O_3$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ) [18]

### **Tamaño.**

El grado de penetración en las vías respiratorias varía considerablemente con el tamaño de la partícula. Está bien documentado que las partículas  $PM_{10}$  quedan retenidas en los bronquios y los bronquiolos, las  $PM_{2.5}$  quedan retenidas en los bronquiolos respiratorios y las  $PM_{0.1}$  pueden llegar hasta los alvéolos pulmonares. A la fecha no hay estudios que concluyan cuál es el tamaño que causa más efectos adversos a la salud.

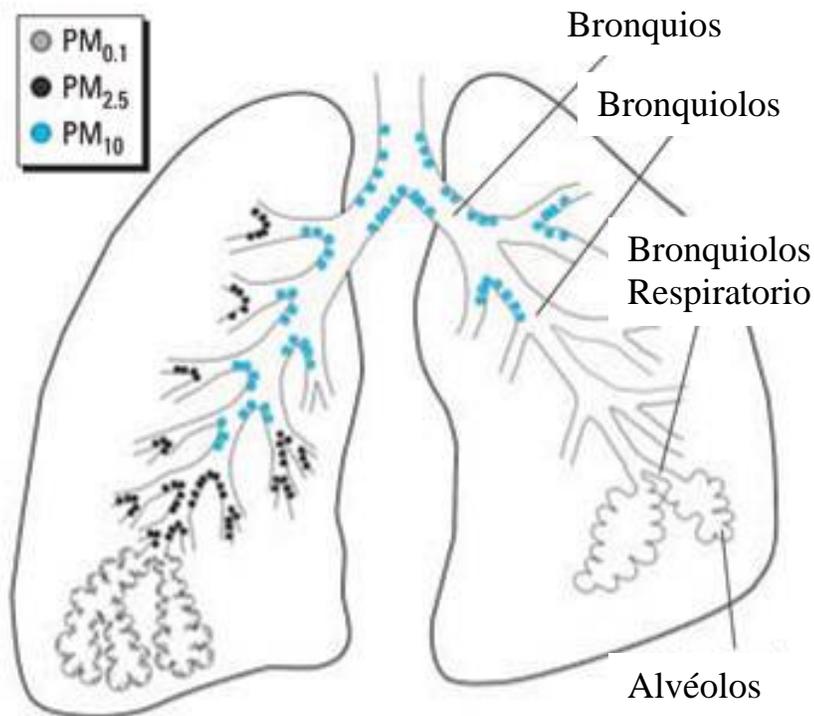


Figura 1.3.- Niveles de penetración pulmonar del material particulado

### Composición química.

La composición química de las partículas ambientales es muy variada y compleja. **En términos generales se divide en una fracción inorgánica y otra orgánica.** La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y materiales térreos. La fracción orgánica contiene cientos quizás miles de compuestos dentro de los que encontramos carbono elemental, compuestos orgánicos volátiles,

componentes biológicos tales como alérgenos y endotoxinas. También en esta fracción se encuentran los **Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH's)**, un grupo de compuestos en los que se ha demostrado ampliamente los efectos adversos a la salud (19 -22).

### **3.- Hidrocarburos aromáticos policíclicos.**

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) son compuestos orgánicos formados por la fusión de dos o más anillos aromáticos (Figura 1). Los anillos pueden estar en forma recta, angulada o en racimos. En la naturaleza se encuentran como mezclas complejas tanto en aire, tierra y agua. Se conocen más de 1000 PAH's, la mayoría de ellos son sustancias sólidas, incoloras, blancas o amarillo verdoso. Como compuestos individuales pueden ser manufacturados para propósitos de investigación. La estructura condensada más sencilla, formada por sólo dos anillos aromáticos es el naftaleno

#### **3.1 Fuentes de PAH's**

Los PAH's se forman por pirólisis o combustión incompleta de materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno (23). La contribución de las fuentes naturales, como los incendios forestales y los volcanes, es mínima comparada con las emisiones causadas por el ser humano. La combustión de combustibles fósiles es la principal fuente de emisión de PAH's. Otras emisiones proceden

de la combustión de residuos y madera, así como de los vertidos de petróleo crudo o refinado que en sí mismo contiene PAH's. Estos compuestos también están presentes en el humo del tabaco y en los alimentos a la parrilla, ahumados y fritos. La principal fuente de PAH's es el aire de las atmósferas de trabajo de alquitrán de hulla, que se forman por pirólisis de la hulla en fábricas de gas y coque, donde se producen emisiones de humos de la brea calentada. Generalmente, el contenido de BaP es máximo en el aire situado en la parte superior de los hornos.

### **3.2 Efecto de los PAH's en la salud.**

Los estudios epidemiológicos indican una mayor frecuencia de cáncer de pulmón en los trabajadores de las industrias de coque, aluminio y acero. Los efectos tóxicos de algunos PAH's sobre la piel están asociados con dermatitis aguda y crónica con síntomas de quemazón, picor y edema, que son más pronunciados en las regiones de la piel expuesta. La exposición prolongada causa pigmentación en las zonas de la piel expuesta, con cornificación de las capas superficiales y telangiectasis. También se puede observar irritación de las vías aéreas superiores con bronquitis y tos crónica.

En los ojos producen lagrimeo, fotofobia, edema de párpados e hiperemia conjuntival. Actualmente se admite que los PAH's son previamente activados en el organismo antes de ejercer su efecto como disruptor endocrino o cancerígeno/mutágeno. **Tras la exposición prolongada pueden producir cáncer cutáneo (escroto y cara), cáncer broncogénico en vías respiratorias, cáncer de vejiga; en el sistema hematopoyético pueden originar leucemia y linfoma (25, 29).**

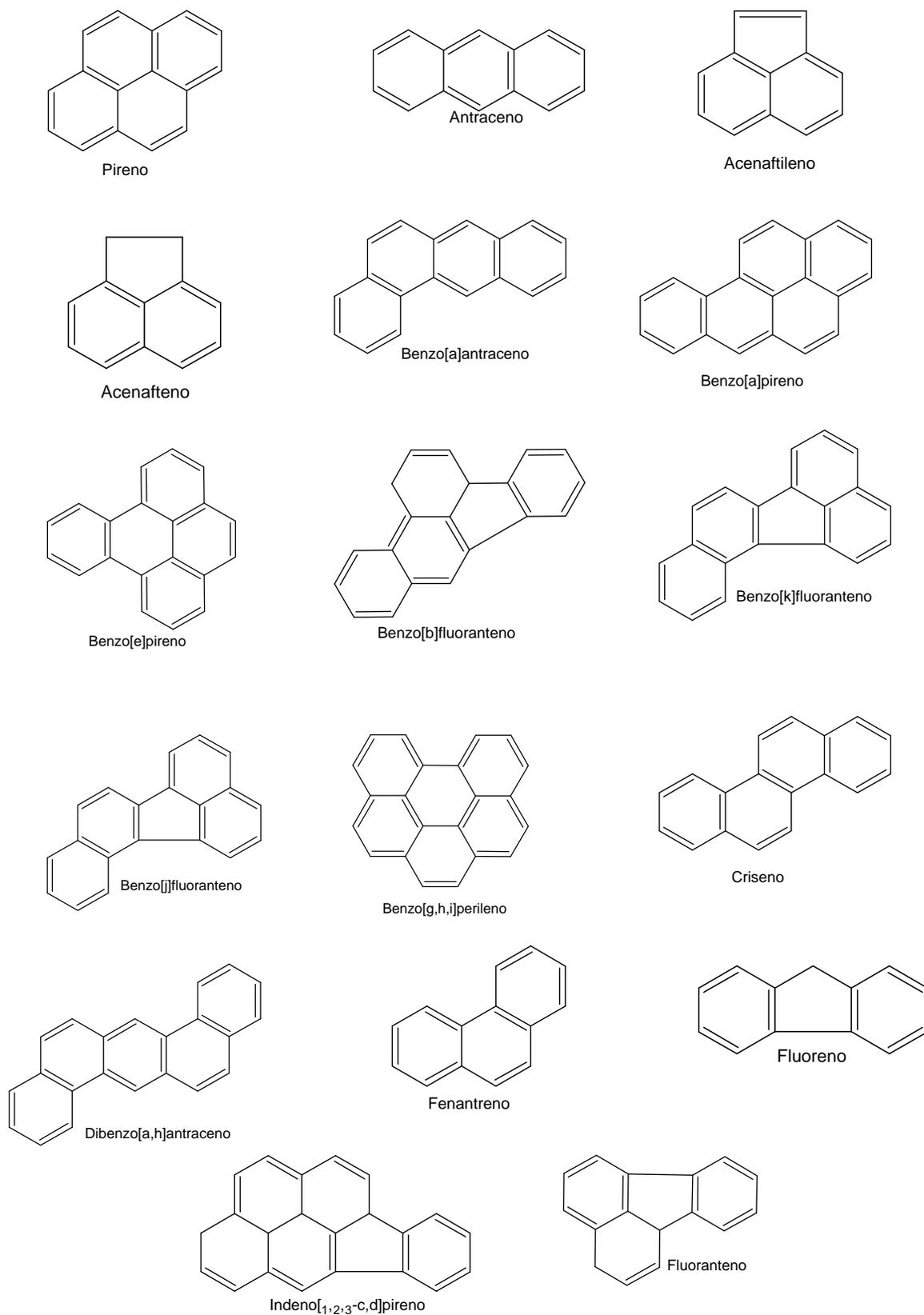


Figura 1.4.- 17 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos que recomienda la EPA monitorear continuamente.

#### **4.- Concentración y tiempo de exposición**

Los niveles atmosféricos de las partículas ambientales varían ampliamente de un lugar a otro y de un momento a otro, lo que modifica su grado de exposición. **Las grandes ciudades son las que presentan mayores niveles de partículas ambientales debido al mayor número de fuentes contaminantes y a determinadas condiciones geográficas y meteorológicas.** En México las principales ciudades que presentan niveles considerables de partículas son: la ciudad de México DF, Guadalajara y **Monterrey**

#### 4.1 Área Metropolitana de Monterrey

El área metropolitana de monterrey se ubica en el estado de Nuevo León al Noreste de México. Incluye la ciudad capital del estado de Nuevo León, Monterrey, y parte de los municipios de García, Gral. Escobedo, San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Juárez, Cadereyta Jiménez, Santiago, Santa Catarina, San Pedro Garza García y García. El área ocupa el 1.2 % de la superficie del estado y sus coordenadas geográficas son: al norte, 25° 48'; al sur, 25° 29' de latitud norte; al este, 100° 10'; y al oeste, 100° 25' de longitud oeste. Tiene una población de 3 412 421 habitantes, un numero de vehículos registrados de 1 243 871 unidades y 9 740 unidades activas de industrias manufactureras (33, 34).

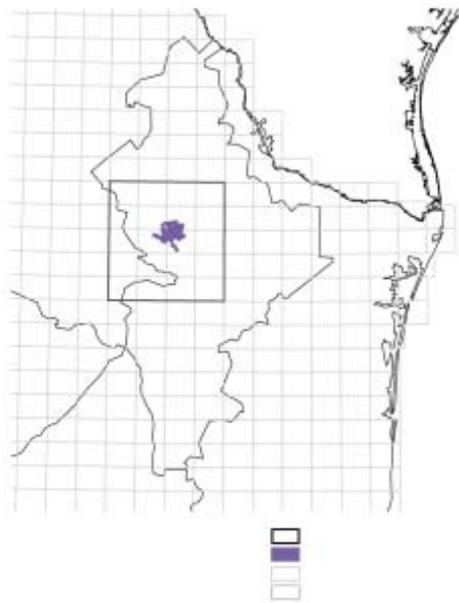


Figura 1.5.- Ubicación del Área Metropolitana de Monterrey

El área metropolitana de Monterrey se encuentra rodeada por la Sierra Madre Oriental, el cerro de la silla, el cerro de las mitras y el cerro del topo chico. Estas elevaciones montañosas constituyen una barrera física natural para la circulación del viento e impiden el desalojo de contaminantes atmosféricos.

El área metropolitana de Monterrey se halla sujeta a la influencia de sistemas anticiclónicos procedentes del golfo de México que provocan estabilidad atmosférica, he inhiben el mezclado vertical del aire.



Figura 1.6.- Cerro de la Silla visto desde la azotea del edificio de cardiología de la Facultad de Medicina UANL.

Las características anteriores pueden favorecer la aparición de episodios de severa contaminación atmosférica por lo que en 1992 se estableció el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA). Este sistema está compuesto por una red de 5 estaciones de monitoreo que miden continuamente los niveles de los contaminantes CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y **PM<sub>2.5</sub>**. Con base a un plan de contingencia recomienda limitar actividades físicas al aire libre hasta recomendar a las industrias disminuir sus emisiones a la atmósfera (35).

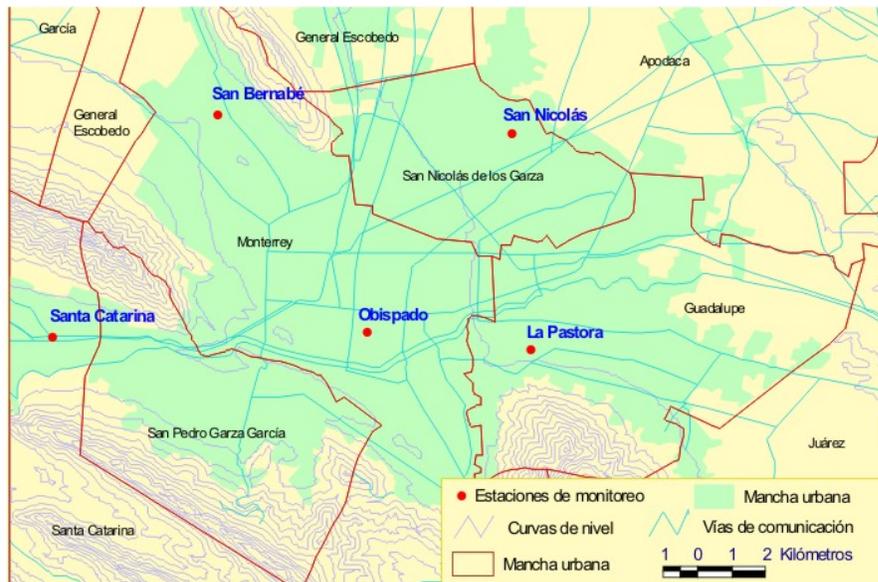


Figura 1.7.- Estaciones de monitoreo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental en el Área Metropolitana de Monterrey.

A pesar de los grandes avances en el conocimiento de la contaminación por partículas ambientales, se necesita más investigación que permita comprender los mecanismos biológicos por los que la exposición a partículas finas se asocia con aumentos en la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar. El estudio de la composición química de las partículas ambientales puede aportar información sobre los componentes causantes de los efectos adversos así como determinar si las partículas PM2.5 de diferentes lugares son equivalentes en su toxicidad. Estos estudios complementados con estudios epidemiológicos proporcionaran las bases para el establecimiento de políticas ambientales que controlen razonablemente la contaminación del aire y por ende proporcionen un ambiente mas seguro para las personas más sensibles.

## **Justificación**

Considerando que los niveles de PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey rebasan los niveles establecidos por la norma oficial mexicana, el gran número de habitantes con exposición a estos, la carencia de información respecto de su composición química y el probable impacto que tienen en la salud, es que se planteó el presente proyecto de investigación.

## **Objetivo General**

Cuantificar los niveles de 14 PAH's en las partículas ambientales PM<sub>2.5</sub> en una zona con alto tráfico vehicular y otra con potencial exposición industrial del área metropolitana de Monterrey. Los PAH's cuantificados fueron los siguientes: Acenafteno, Antraceno, Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno, Naftaleno, Pireno, Benzo(A)Antraceno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(k)Fluoranteno, Benzo(a)Pireno, Benzo(ghi)Perileno, Criseno e Indeno (1,2,3 cd)Pireno.

## **Objetivos específicos.**

1. Colectar las muestras de partículas ambientales en la zona con alto tráfico vehicular y con potencial exposición industrial.
2. Validar los procedimientos de preparación y análisis de partículas PM<sub>2.5</sub> para las determinaciones de PAH's.
3. Determinar cuantitativamente los niveles de 14 PAH's en las muestras obtenidas.

# Capítulo II

## Material y métodos

### Material

#### Equipos

Cromatógrafo de líquidos de alta resolución (HPLC). Agilent 1100.

Muestreador de alto volumen Hi-Vol para partículas PM2.5. (TICHS<sup>®</sup> Environmental).

#### Material.

Kit de calibración equipos Hi-Vol Variflo.

Manómetro.

Balanza analítica.

Desecador.

Silica gel con marcador.

Filtros de Fibra de vidrio GF/A Watman.

Papel aluminio.

Muffla.

Cortador, tijeras.

Congelador - 80° C.

Baño de ultrasonido.

Bomba de vacío.

Columna Supelcosil LC-PAH

Micropipetas 100, 1000µL.

Puntillas 100, 1000 µL.

Sistema de filtración de solventes Milipore.

Matraces de aforación 100, 250, 500 mL.

Pipetas volumétricas 10, 25 mL.

Plancha de calentamiento.

Filtros 0.45 µm Milipore.

Viales de vidrio ámbar de 2 mL con tapón de rosca y Septem de PTFE/Silicon.

Termómetro -10 -200° C.

Vaso precipitado 500, 1000 mL.

Gradillas para viales de 2 mL.

## **Reactivos**

Acetonitrilo grado HPLC.

Diclorometano grado HPLC.

Agua bidestilada.

# Métodos

## 1.- Muestreo de partículas PM2.5.

### 1.1.- Cronograma de muestreo.

El muestreo de partículas se realizó cada 6 días a partir del 28 de Febrero de 2008 hasta el 28 de Febrero de 2009. Se utilizó en cada sitio 1 muestreador de alto volumen (TISH<sup>®</sup> Environmental), con separador para PM2.5. En situaciones de lluvia o humedades relativas mayores al 80 %, se cambió el día de muestreo por el siguiente día y así sucesivamente hasta 3 días consecutivos. En casos donde se pasó del límite de 3 días, fue suspendido el muestreo y se procedió a continuar con la siguiente fecha del cronograma. Se registraron las condiciones meteorológicas de temperatura, humedad y velocidad del viento en las estaciones suroeste (SO) y Centro (CE) del SIMA.



Figura 2.1 Muestreador de alto volumen (TISH<sup>®</sup> environmental)

## **1.2.- Sitio de muestreo.**

La selección del sitio de muestreo se llevó a cabo tomando en cuenta los niveles de contaminación en las diferentes zonas así como la conveniencia de colocar los equipos en tales sitios. Para la zona 1 el equipo Hi-Vol se colocó en el edificio de cardiología de la Facultad de Medicina UANL ubicado en el cruce de las avenidas Madero y Jose Eleuterio González del municipio de Monterrey en la zona Centro (CE) del AMM. En la zona 2 el equipo se colocó en la estación de monitoreo suroeste del SIMA ubicada en el municipio de Santa Catarina al Suroeste (SO) del AMM. La zona 1 representa una zona con potencial exposición industrial y presenta elevados niveles de contaminación con respecto a las demás estaciones según datos del SIMA y la zona 2 representa una zona con alto tráfico vehicular. (Figura 2.2).

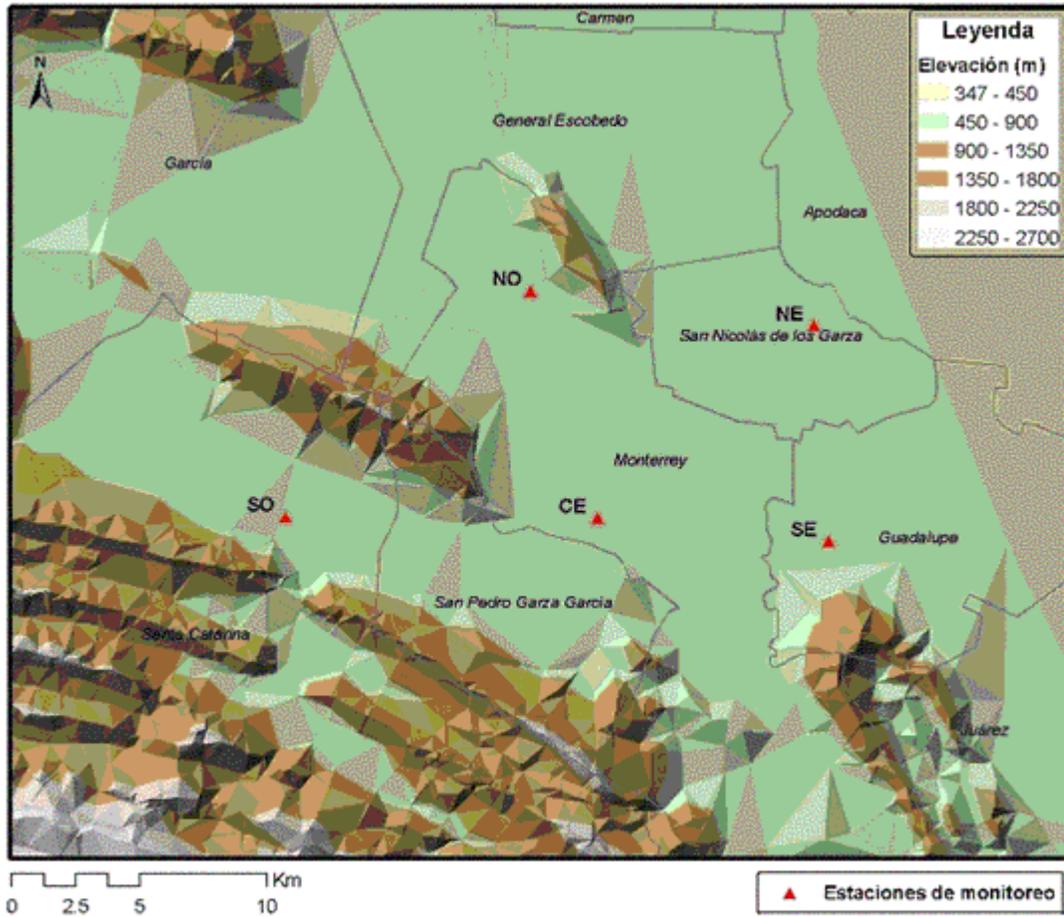


Figura 2.2 Red del SIMA. Área Metropolitana de Monterrey

### 1.3.- Calibración del equipo Hi-Vol.

La calibración del muestreador de partículas PM<sub>2.5</sub> se realizó el día en que se colocó en el sitio de monitoreo y cuando se le dio mantenimiento al motor (cada 700 horas de muestreo). En el anexo 1 se detallan los pasos en la calibración del equipo.

#### 1.4.- Preparación de filtro.

Con el fin de eliminar cualquier traza de PAH's que pudiera interferir en el análisis, los filtros previamente envueltos en papel aluminio, se hornearon en mufla a 500° C por 4 horas. Se envolvieron en su papel aluminio y se guardaron en bolsas Ziploc® hasta su acondicionamiento.



Figura 2.3 Envoltura de filtros en papel aluminio previa inspección visual

#### 1.5.- Obtención de la muestra.

El filtro previamente horneado se marcó de 2 esquinas con un código interno. Los primeros 2 dígitos del código corresponden al año, el tercero al tipo de estudio (1 PAH's, 2 Metales), y los últimos 3 a la secuencia numérica en que fueron utilizados para el muestreo. Ejemplo: 081001 corresponde a la primera muestra de PAH's del año 2008.

El filtro una vez marcado se acondicionó por 24 horas a una temperatura de  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  y humedad  $< 50\%$ . Para mantener la humedad del filtro, este se colocó en un desecador con silica gel.

Posteriormente se pesó en una balanza analítica de 4 dígitos decimales.

Se envolvió en su papel aluminio, se guardó en una bolsa Ziploc<sup>®</sup> y se transportó al sitio de muestreo.

El filtro se colocó en el muestreador de partículas PM2.5 Hi-Vol (TISH<sup>®</sup> Environmental) (figura 2.4).

El equipo se encendió y así permaneció por 2 minutos, se registró la caída de presión del venturi.

Se dejó funcionando por  $24 \pm 1$  horas.



Figura 2.4 Colocación de filtro en equipo Hi-Vol

Transcurrido el tiempo de muestreo se registró nuevamente la caída de presión del venturi.

Se apagó el equipo y se retiró el filtro.

El filtro se dobló a lo largo para que las partículas quedaran cubiertas por el mismo filtro y se envolvió con su papel aluminio (Figura 2.5).

Se transportó al laboratorio en una hielera a una temperatura de 7-10° C

La muestra se rechazó si hubo bajas considerables del voltaje en el equipo, si el tiempo de muestreo fue menor a 23 horas o si la muestra se contaminó accidentalmente durante su transporte.



Figura 2.5 Filtro doblado con partículas PM2.5

El filtro con muestra se acondicionó por 24 horas a las mismas condiciones previas al muestreo y posteriormente se tomó su peso.

Las muestras se conservaron a -80 ° C hasta su análisis.

El volumen de aire total ( $m^3$ ) muestreado se calculó con los datos de temperatura ambiental, presión atmosférica y las caídas de presión inicial y final del venturi. (Anexo 2)

Los niveles de PM2.5 ( $\mu g/m^3$ ) se calcularon con el volumen de aire muestreado y la diferencia de los pesos inicial y final de los filtros. (Anexo 2)

## 2.- Validación del método analítico

Previo a la validación del método analítico se realizó la validación del sistema cromatográfico. La validación de un método analítico consiste en el establecimiento de una base de datos experimental que certifica que el método analítico se desempeña adecuadamente para cumplir los requerimientos de las aplicaciones pretendidas (37). Implica la demostración de la determinación de las Fuentes de variabilidad y del error sistemático y al azar de un procedimiento, no solo dentro de la calibración sino en el análisis de las muestras reales.

Los parámetros que utilizamos para validar tanto el sistema cromatográfico como el método completo fueron: Linealidad, exactitud, precisión, límite de cuantificación, límite de detección.

**Linealidad.** La linealidad de un método analítico es su capacidad (Dentro de un rango dado) para obtener resultados de prueba que son directamente proporcionales a la concentración del analito en la muestra.

**Exactitud.** La cercanía entre el valor que es aceptado, sea como un valor convencional verdadero (material de referencia interno de la firma), sea como un valor de referencia aceptado (material de referencia certificado o

estándar de una farmacopea) y el valor encontrado (valor promedio) obtenido al aplicar el procedimiento de análisis un cierto número de veces.

**Precisión.** Expresa el grado de concordancia (grado de dispersión) entre una serie de mediciones obtenidas de múltiples muestreos de una misma muestra homogénea bajo condiciones establecidas. Puede considerarse a tres niveles: repetibilidad, precisión intermedia y reproducibilidad.

Debe determinarse utilizando muestras originales y homogéneas. Sin embargo, si no es posible obtener una muestra homogénea puede ser determinada usando muestras preparadas o una disolución de la muestra.

La precisión de un método analítico se expresa como la varianza, desviación estándar o el coeficiente de variación de una serie de mediciones.

**Repetibilidad:** Precisión obtenida bajo las mismas condiciones de operación en un intervalo corto de tiempo (mismo día), por un mismo analista, en la misma muestra homogénea y en el mismo equipo.

**Reproducibilidad:** Expresa la precisión entre laboratorios como resultado de estudios diseñados para estandarizar la metodología.

**Límite de cuantificación:** Cantidad más pequeña del analito en una muestra que puede ser cuantitativamente determinada con precisión aceptable. Es un parámetro del análisis cuantitativo para niveles bajos de compuestos en

matrices de muestra y se usa particularmente para impurezas y productos de degradación. Se expresa como concentración del analito.

**Límite de detección:** Cantidad más pequeña de analito en una muestra que puede ser detectada por una única medición, con un nivel de confianza determinado, pero no necesariamente cuantificada con un valor exacto.

## 2.1.- Validación del sistema cromatográfico.

Solo se evalúa la etapa de análisis instrumental. En este trabajo se tomaron como criterios de aceptación los establecidos por US-EPA Method 8000B; Rev.2 1996 (38).

Se trabajó con un cromatógrafo de líquidos de alta resolución (HPLC) con las siguientes condiciones de operación (39,40).

Cromatógrafo	HPLC Agilent 1100 con automuestreador y bomba cuaternaria
Detector	Fluorescencia.
Fase móvil	A agua B acetonitrilo
Elución	Gradiente A-B 40-60 % minuto 0 A-B 40-60 % minuto 11 A-B 0-100 % minuto 12 A-B 0-100 % minuto 24 A-B 0-100 % minuto 25
Temperatura	27° C
Volumen de inyección	20 µL
Tiempo de análisis	30 minutos

### **Longitudes de excitación y emisión.**

Para establecer el programa de longitudes de onda de excitación y emisión óptimos para el análisis de PAH's, primeramente se prepararon soluciones estándar de cada uno de los PAH's a concentraciones de 0.3 µg/mL. Posteriormente se corrieron tantas veces fuera necesario, cada uno de los estándares de PAH's en el HPLC/FLU. En cada corrida se registró el tiempo de retención y el área bajo la curva de cada PAH's. Las longitudes de excitación y emisión del detector de fluorescencia se modificaron hasta obtener la señal mas intensa correspondiente a un pico grande y una mayor área bajo la curva. Una vez obtenidas las longitudes optimas de cada PAH's, se prepararon 3 mezclas PAH's. La primera mezcla corresponde a los primeros 5 PAH's, la segunda a los siguientes PAH's y la tercera a los 4 últimos PAHs. Cada una de las mezclas se corrió en el HPLC y se ajustaron las longitudes del detector según fuera necesario. Por último se mezclaron todos los PAH's para obtener una mezcla final de 14 PAH's. Esta mezcla se inyectó varias veces en el cromatógrafo ajustando las longitudes de excitación y emisión con cada corrida hasta que se obtuvieron las óptimas para el análisis final.

### 2.1.1.- Linealidad del sistema.

Para cada PAH's se prepararon soluciones estándar de calibración a 5 niveles de concentración por triplicado y se analizaron por HPLC/FLU. Con la respuesta obtenida se elaboró la gráfica calibración correspondiente graficando la respuesta en función del tiempo. Se obtuvo la ecuación de la recta por medio del análisis de mínimos cuadrados así como el coeficiente de correlación (r) utilizando el programa EXCEL<sup>®</sup>. El criterio de aceptación es que el coeficiente de correlación sea  $\geq 0.995$ . Se calcularon los factores de respuesta (FR) para cada uno de los puntos de la gráfica utilizando la siguiente ecuación:

$$FR = \text{Respuesta del detector} / \text{Concentración del estándar}$$

Donde:

$$\text{Respuesta del detector} = \text{Área del pico}$$

$$\text{Concentración del estándar} = \mu\text{g/mL}$$

Se calculó la desviación estándar relativa de los factores de respuesta ( % DER) para cada nivel de concentración y se promediaron los resultados de todos los puntos. El criterio de aceptación establecido fue  $\leq 20$  %.

### **2.1.2.-Precisión del sistema.**

Con los estándares previamente preparados de 5 niveles de concentración por triplicado, se calculó el promedio y la desviación estándar relativa para cada nivel de concentración. La desviación estándar relativa, conocida también como coeficiente de variación, se calculó con la siguiente fórmula.

$$\% \text{ DER} = (\text{SD} \times 100) / \text{promedio.}$$

Donde:

% DER = Desviación estándar relativa.

SD = Desviación estándar.

El criterio de aceptación en cada uno de los niveles de concentración y como promedio general fue  $\text{DER} \leq 15 \%$ .

### **2.1.3.- Exactitud**

Se determinó el error residual al aplicar la ecuación de la gráfica a cada una de las áreas obtenidas durante la misma calibración y se calculó el % de Error. El error máximo a cada nivel de concentración se estableció como  $\leq 15 \%$  y el promedio de los 5 niveles  $\leq 15 \%$ .

#### **2.1.4.- Limite de cuantificación.**

En este trabajo se estableció como límite de cuantificación el valor menor del intervalo de calibración que cumple con el criterio de precisión  $DER \leq 20 \%$

#### **2.1.5.- Limite de detección.**

En este trabajo se estableció como límite de detección un valor menor al límite de cuantificación que cumple con la condición de Señal/Ruido  $\geq 3$ .

## **2.2.- Validación del método**

En esta fase se evalúan las etapas de preparación de la muestra y de análisis instrumental.

Como criterios de aceptación se establecieron los descritos por el método USA-EPA Method TO-13<sup>a</sup> (41).

### **2.2.1.- Preparación de la muestra.**

Del centro de cada filtro con muestra de partículas PM<sub>2.5</sub>, se cortó una tira de 1 x 8 pulgadas. Para evitar contaminación cruzada, el cortador se limpio con metanol después de cada corte.

La tira se colocó en un frasco ámbar de 30 mL y posteriormente se le agregaron 30 mL del solvente de extracción DCM/ACN (2:1).

El frasco se agitó en ultrasonido por 30 minutos y en intervalos de 10 minutos se cambió el agua del sonicador para evitar sobrecalentamientos.

El volumen se redujo hasta  $\approx 2$  mL usando corriente de nitrógeno y baño de agua 45° C.

Se midió el volumen con una micropipeta de 1 mL y se filtró utilizando filtros con poro de 0.45  $\mu\text{m}$  (Millipore).

Del filtrado se tomó 1 mL y se transfirió a un vial ámbar de 1.5 mL con tapa de Silicón y septa de PTFE.

Se redujo el volumen con corriente de nitrógeno hasta  $\approx 200\mu\text{L}$ .

Se inyectaron 20  $\mu\text{L}$  en el HPLC.

### **2.2.2.- Linealidad**

Se procesaron filtros fortificados a 5 niveles de concentración por triplicado. Se determinaron los factores de respuesta, la desviación estándar relativa de los factores de respuesta y el coeficiente de correlación de la misma manera como se hizo en la validación del sistema.

### **2.2.3.- Precisión y exactitud a condiciones de repetibilidad.**

Se analizaron el mismo día filtros fortificados a 3 niveles de concentración por quintuplicado. Los niveles utilizados fueron diferentes a los que se utilizaron en la evaluación de la linealidad. Se calculó la precisión de la misma manera que en la validación del sistema y el % de error (% E) con la siguiente fórmula.

$$\% E = (CE - CO / CE) \times 100$$

Donde :

CE = Concentración esperada.

CO = Concentración obtenida.

Los criterios de aceptación en cada nivel de concentración y como promedio de los 5 puntos de la gráfica, fueron % DER  $\leq$  30 para la precisión y % Error  $\leq$  20 para la exactitud.

#### **2.2.4.- Precisión y exactitud a condiciones de reproducibilidad.**

Se analizaron en 3 días diferentes filtros fortificados a 3 niveles de concentración por duplicado. Los niveles utilizados fueron diferentes a los que se utilizaron en la evaluación de la linealidad. Se calculó la exactitud y la precisión de la misma manera que en las condiciones de repetibilidad.

Los criterios de aceptación en cada nivel de concentración y como promedio de los 5 puntos de la gráfica, fueron % DER  $\leq$  30 para la precisión y % error  $\leq$  20 para la exactitud.

#### **2.2.5.- Exactitud como porcentaje de recuperación (%R).**

Se fortificaron filtros a 3 niveles de concentración por triplicado y se sometieron a todo el proceso de extracción. Se analizaron estándares de los mismos niveles de concentración sin someterlos al proceso de extracción y se determinó el porcentaje de recuperación por comparación de las áreas obtenidas. La fórmula utilizada fue la siguiente.

$$\%R = AO \cdot 100 / AE.$$

Donde:

AO = Área obtenida.

AE = Área esperada.

El criterio de aceptación para este trabajo fue 70-130 %.

### **2.2.6.- Limite de cuantificación y limite de detección.**

Se evaluaron del mismo modo que se hizo en la validación del sistema cromatográfico.

### **Objetivo 3.- Determinar cuantitativamente los niveles de 14 PAH's en las muestras obtenidas.**

El método previamente validado se aplicó a los filtros para el análisis cualitativo y cuantitativo de PAH's. La identificación se realizó comparando el tiempo de retención de la muestra con el del estándar. El análisis cuantitativo se realizó integrando las áreas bajo la curva de cada PAH's y aplicando la ecuación de regresión. Cada 10 muestras se procesó un blanco y 3 filtros fortificados con 14 PAH's a 3 diferentes concentraciones.

### **Determinación del riesgo por exposición a PAH's.**

El riesgo potencial de los PAH's puede ser determinado en términos del benzo(a)pireno que es un indicador de carcinogenicidad. Cada PAH's es convertido a el equivalente de B(a)P multiplicando la concentración obtenida por un factor de equivalencia tóxica (TEF) reportado en la literatura. La suma de todos los PAH's convertidos se reporta como equivalentes de B(a)P **(B(a)P<sub>eq</sub>)**. Debido a que no hay un límite establecido por exposición a B(a)P<sub>eq</sub> en la legislación mexicana, para este trabajo se tomó como valor de referencia el recomendado por la legislación de Arizona USA  $0.5 \text{ ng/m}^3$ . En la tabla 2.1 se muestran los factores de conversión hacia equivalentes de B(a)P.

Tabla 2.1.- Factores de equivalencia toxica (TEF's) para PAH's.

PAH's	TEF's	PAH's	TEF's
Dibenzo(a,h)Antraceno	5	Benzo(a)Antraceno	0.1
Benzo(a)pireno	1	Criseno	0.01
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	0.1	Antraceno	0.01
Pireno	0.001	Acenafteno	0.001
Benzo(b)Fluoranteno	0.1	Acenaftileno	0.001
Benzo(k)Fluoranteno	0.1	Fluoreno	0.001
Benzo(ghi)Perileno	0.01	Naftaleno	0.001
Fluoranteno	0.001	Fenantreno	0.001

### Estimación de las fuentes de PAH's

Para estimar la probable contribución de las fuentes de PAH's en el AMM, utilizamos radios diagnósticos que previamente han sido reportados. En la tabla 2.2 se muestran los valores de radios diagnósticos reportados para estimar la contribución de fuentes como son: vehículos, madera, carbón y emisiones industriales.

Tabla 2.2 Radios diagnósticos para emisiones de PAH's

Radio	Vehículos Gasolina	Vehículos Diesel	Madera	Carbón mineral	Industria
B(ghi)P/B(a)P	2.5-3.3	1.2-2.2			
B(a)P/B(ghi)P	0.30-0.44			0.90-6.6	
[B(b)F+B(k)F]/B(ghi)P			2.18	-	7.10-11.20
B(a)A/[B(a)A+ Cri]	0.76	0.73	0.43	0.50-0.55	-
B(a)P/[B(a)P+ Cri]	0.73	0.49			

## **Análisis de resultados**

Los datos obtenidos se analizaron con el paquete SSPS. Se obtuvo la estadística descriptiva de los niveles de PM2.5 y se utilizó un diseño bloques al azar, tomando como bloque cada día de las mediciones para buscar diferencia estadísticamente significativa en las 2 zonas con respecto a los niveles de PM2.5. Los niveles de cada PAH's se analizaron estadísticamente de la misma manera que los niveles de PM2.5. Se realizó un análisis de correlación múltiple para medir el grado de asociación entre las variables.

## **CAPITULO III**

### **Resultados**

#### **Objetivo 1.- Obtención de muestras**

Se obtuvieron un total de 117 muestras en el periodo comprendido del 28 de Febrero del 2008 al 28 de Febrero del 2009. De la zona 1(Cardiológia) se obtuvieron 60 muestras y de la zona 2 (Santa Catarina) se obtuvieron 57 muestras. Las bajas del voltaje en la estación suroeste (Zona 2), provocaron que el tiempo de muestreo fuera menor a 23 horas en 3 fechas de muestreo por lo que se tuvieron que rechazar.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de las estaciones CE y SO del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental SIMA

En la zona 1 (n=60) los valores mínimo y máximo fueron 11.44 y 73.66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, con un promedio anual de 26.63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\pm\text{SD} = 11.96$ ). En la zona 2 (n=57) los valores mínimo y máximo fueron 12.28 y 79.64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, con un promedio anual de 29.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\pm\text{SD} = 13.23$ ). La diferencia en el promedio anual de las 2 zonas fue de 2.89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabla 3.1.1).

**Tabla 3.1.1- Estadística descriptiva de PM2.5**

Lugar	N	Mínimo	Máximo	Media	SD
Zona 1	60	11.44	73.66	26.63	11.96
Zona 2	57	12.28	79.64	29.52	13.23

Mes	Zona 1	Zona 2
Marzo	32.78	31.18
Abril	31.32	33.56
Mayo	33.13	35.92
Junio	20.33	23.26
Julio	20.55	19.83
Agosto	22.09	22.05
Septiembre	20.31	23.04
Octubre	29.74	35.95
Noviembre	33.56	28.33
Diciembre	39.24	45.74
Enero	21.57	28.53
Febrero	16.30	20.41

**Tabla 3.1.2.- Niveles de PM2.5 por zona y fecha de muestreo**

Fecha de muestreo	Concentración PM2.5 (ng/m <sup>3</sup> )	
	Zona 1	Zona 2
Miércoles, 27 de Febrero de 2008	20.26	32.60
Martes, 04 de Marzo de 2008	24.58	34.89
Lunes, 10 de Marzo de 2008	33.84	23.55
Domingo, 16 de Marzo de 2008	35.09	40.28
Sábado, 22 de Marzo de 2008	28.38	26.00
Viernes, 28 de Marzo de 2008	42.00	43.09
Jueves, 03 de Abril de 2008	39.27	47.05
Miércoles, 09 de Abril de 2008	39.51	42.18
Martes, 15 de Abril de 2008	20.98	23.35
Lunes, 21 de Abril de 2008	36.49	37.60
Domingo, 27 de Abril de 2008	20.35	17.60
Sábado, 03 de Mayo de 2008	28.79	33.65
Viernes, 09 de Mayo de 2008	46.37	53.90
Jueves, 15 de Mayo de 2008	36.30	32.40
Miércoles, 21 de Mayo de 2008	32.48	35.16
Martes, 27 de Mayo de 2008	21.68	24.46
Lunes, 02 de Junio de 2008	15.32	17.66
Domingo, 08 de Junio de 2008	11.44	25.24
Sábado, 14 de Junio de 2008	23.11	20.91
Viernes, 20 de Junio de 2008	25.42	25.72
Jueves, 26 de Junio de 2008	26.37	28.73
Miércoles, 02 de Julio de 2008	18.55	21.84
Jueves, 10 de Julio de 2008	12.00	13.02
Lunes, 14 de Julio de 2008	25.20	25.73
Domingo, 20 de Julio de 2008	17.76	18.72
Sábado, 26 de Julio de 2008	29.26	32.00
Viernes, 01 de Agosto de 2008	25.71	27.01
Jueves, 07 de Agosto de 2008	22.42	22.96
Miércoles, 13 de Agosto de 2008	23.49	22.75
Miércoles, 20 de Agosto de 2008	20.70	
Sábado, 02 de Agosto de 2008	18.11	15.49
Sábado, 06 de Septiembre de 2008	15.27	16.79
Viernes, 12 de Septiembre de 2008	18.49	21.64
Jueves, 18 de Septiembre de 2008	17.68	24.77
Viernes, 26 de Septiembre de 2008	26.18	23.68
Martes, 30 de Septiembre de 2008	23.91	28.31
Lunes, 06 de Octubre de 2008	33.59	46.33
Sábado, 18 de Octubre de 2008	15.86	20.94
Viernes, 24 de Octubre de 2008	30.01	47.29
Jueves, 30 de Octubre de 2008	25.61	29.23
Miércoles, 05 de Noviembre de 2008	33.19	41.74
Martes, 11 de Noviembre de 2008	32.56	25.52
Lunes, 17 de Noviembre de 2008	48.59	29.02
Domingo, 23 de Noviembre de 2008	50.26	
Sábado, 29 de Noviembre de 2008	19.91	17.02
Jueves, 04 de Diciembre de 2008	18.97	12.28
Jueves, 11 de Diciembre de 2008	19.70	31.86
Miércoles, 17 de Diciembre de 2008	61.04	79.64
Martes, 23 de Diciembre de 2008	73.66	75.87
Lunes, 29 de Diciembre de 2008	22.85	29.04
Domingo, 04 de Enero de 2009	15.33	
Sábado, 10 de Enero de 2009	16.65	18.72
Domingo, 18 de Enero de 2009	23.57	30.36
Jueves, 22 de Enero de 2009	35.52	40.74
Miércoles, 28 de Enero de 2009	16.80	24.29
Martes, 03 de Febrero de 2009	18.90	26.60
Lunes, 09 de Febrero de 2009	19.80	23.60
Domingo, 15 de Febrero de 2009	15.93	21.10
Domingo, 22 de Febrero de 2009	11.87	15.51
Viernes, 27 de Febrero de 2009	15.01	15.23

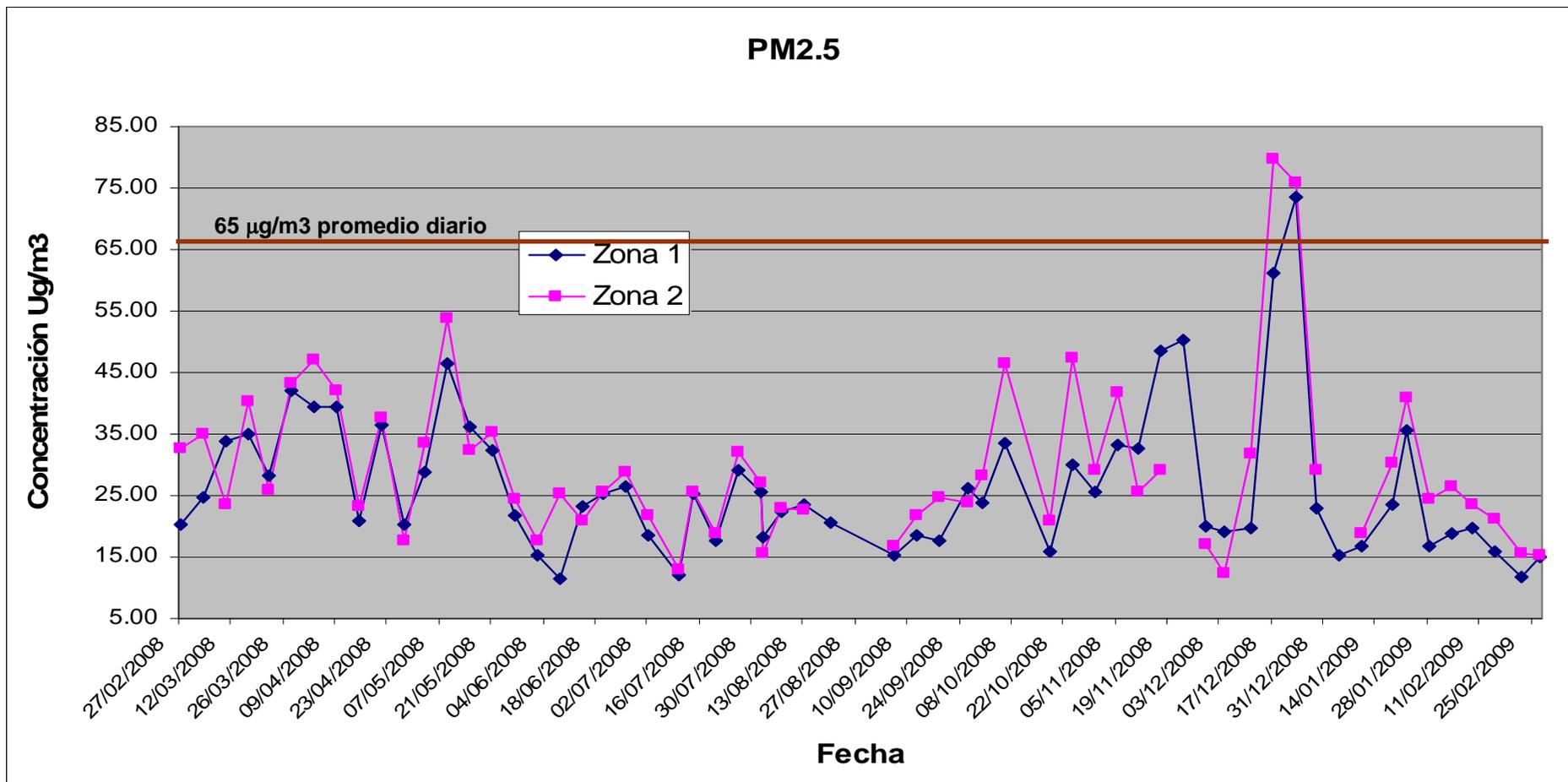


Figura 3.1.- Niveles PM2.5 por fecha de muestreo (65 µg/m<sup>3</sup> es el limite máximo una vez al año permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993)

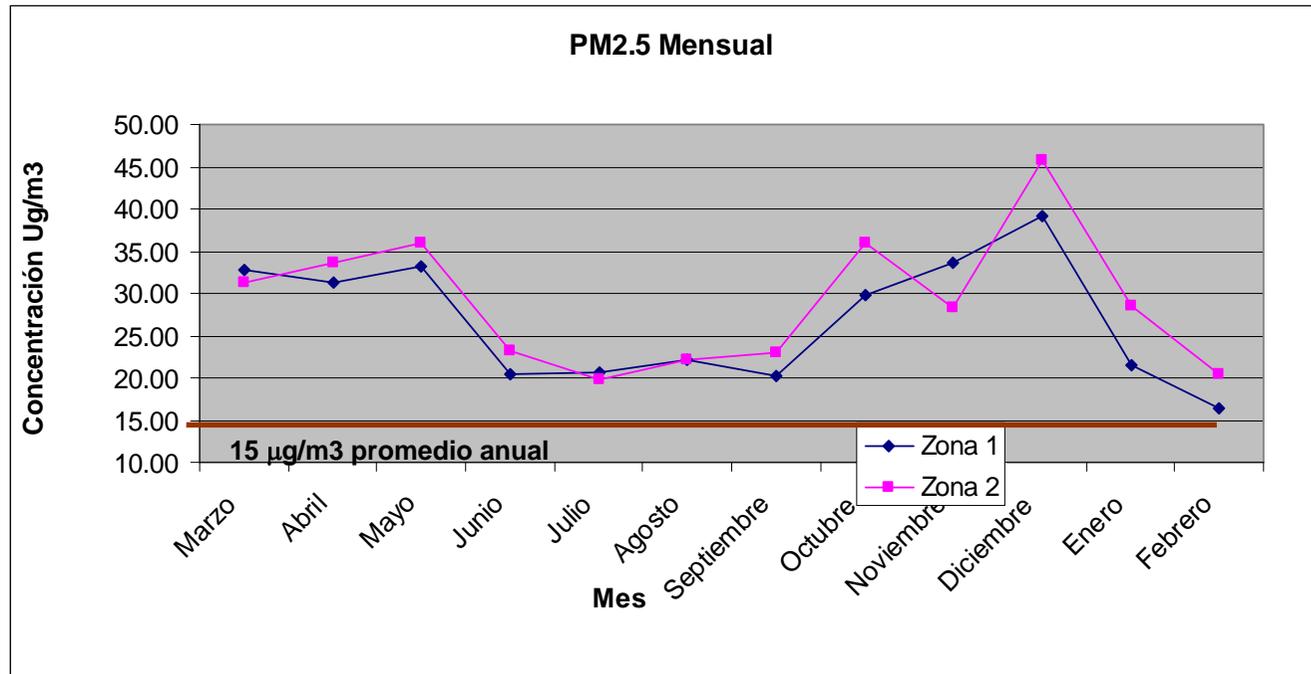
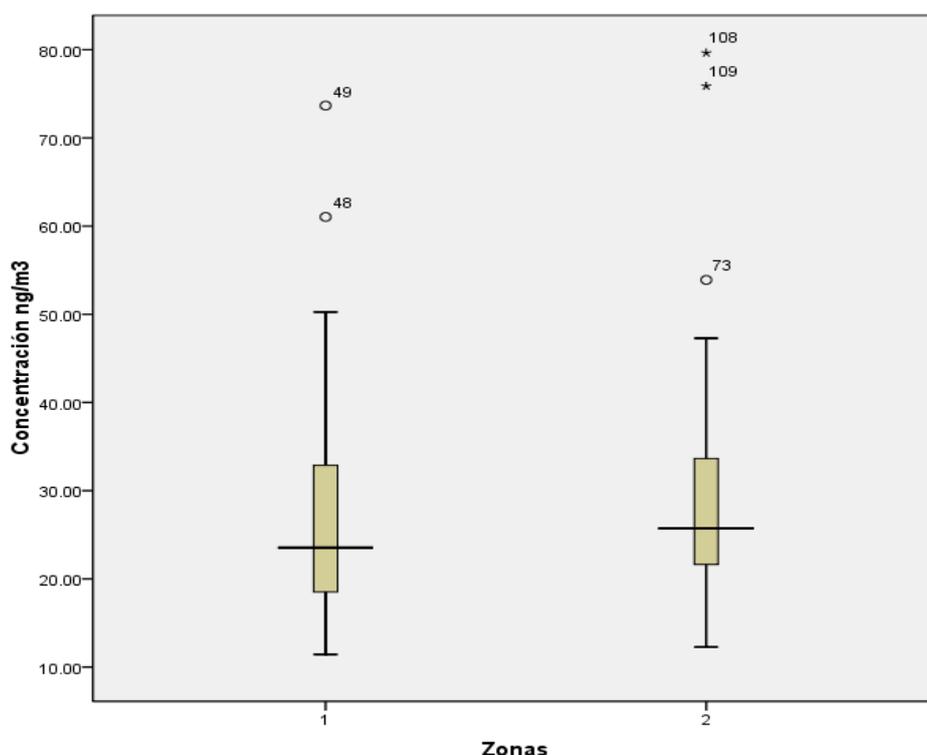


Figura 3.2.- Niveles de PM2.5 como promedio mensual ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  es el limite promedio anual permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993)

En las figuras 3.1 y 3.2 se puede ver el comportamiento temporal de los niveles de PM2.5 durante todo el periodo de muestreo y el promedio mensual. En las graficas de ambas zonas, Diciembre es el mes que presenta los niveles más altos de partículas PM2.5. En este mes se rebaso en ambas zonas el limite máximo diario permitido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993 de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La zona 2 (Santa Catarina) rebasó en dos ocasiones el límite máximo permitido y la zona 1 (Cardiología) lo hizo en una ocasión. Los meses de junio, julio, agosto y septiembre son los que presentan los niveles más bajos de PM2.5 aunque estos también están por encima del promedio anual permitido por la NOM-025-SSA1-1993. de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



El análisis de varianza bajo un diseño bloques al azar, tomando como bloque cada día de las mediciones, indica diferencia altamente significativa entre períodos (días), con un valor de  $p < 0.001$ ; mientras que la diferencia entre la zona 1 y 2, también resultó altamente significativa, con un valor de  $p = 0.001$ .

Tabla 3.1.2. Resultados de Análisis de varianza por bloques al azar

**Tests of Between-Subjects Effects**

Dependent Variable: PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Source		Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Intercept	Hypothesis	88795,688	1	88795,688	307,995	,000
	Error	16779,961	58,203	288,302 <sup>a</sup>		
DÍA	Hypothesis	17131,777	58	295,375	15,067	,000
	Error	1078,247	55	19,604 <sup>b</sup>		
Zona	Hypothesis	224,787	1	224,787	11,466	,001
	Error	1078,247	55	19,604 <sup>b</sup>		

a. ,974 MS(DÍA) + ,026 MS(Error)

b. MS(Error)

### Correlación con variables meteorológicas

La correlación entre la concentración de PM2.5 y las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento se muestran en la tabla 3.1.3. En la zona 1 hubo una correlación positiva con la humedad relativa y una correlación negativa con la velocidad del viento mientras que en la zona 2 solo hubo correlación negativa con la velocidad del viento. El resto de las variables meteorológicas no mostró correlación significativa. Los resultados indican que la variable que más influye en los niveles de contaminación por PM2.5 es la velocidad del viento.

Tabla 3.1.3 Correlación PM2.5 vs variables meteorológicas

Zona		Temp	Hum	Vel Viento	Dlr Viento
1	Correlacion Pearson	-0.030	<b>0.456**</b>	<b>-0.347**</b>	0.149
	Sig. (2-colas)	0.822	<b>0.000</b>	<b>0.008</b>	0.264
	N	58	58	58	58
2	Correlación Pearson	-0.098	0.125	<b>-0.455**</b>	0.192
	Sig. (2-colas)	0.467	0.356	<b>0.000</b>	0.153
	N	57	57	57	57

## Objetivo 2.- Validación del método

### Programa de longitudes de onda de excitación y emisión

En la figura 2.3 se muestra el cromatograma obtenido de una mezcla estándar de 14 PAH's bajo las condiciones de operación y con el programa final de longitudes onda optimizado para cada PAH's (Tabla 2.4)

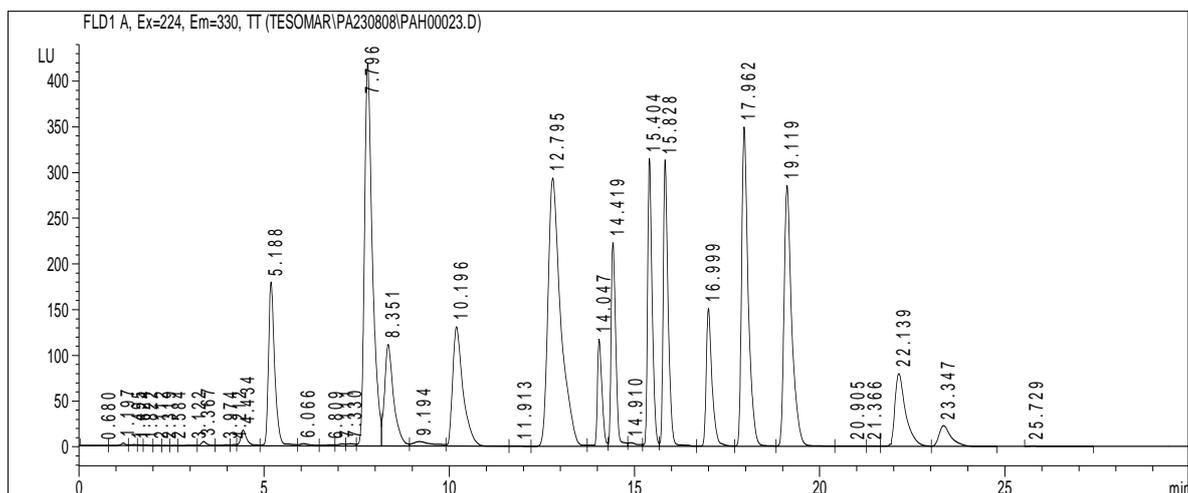


Figura 3.3.- Cromatograma obtenido con el programa de fluorescencia final

Tabla 3.2.1.- Programa final de fluorescencia para la determinación de PAH's.

<b>Tiempo</b>	<b>Analito</b>	<b>Excitación nm</b>	<b>Emisión nm</b>
0	Naftaleno	224	330
6	Acenafteno, Fluoreno	224	323
9.40	Fenantreno	250	366
12	Antraceno	245	400
13.7	Fluoranteno	235	449
14.38	Pireno	235	390
15	Benzo(a)Antraceno	267	395
16.5	Criseno Benzo(b)Fluoranteno	268	430
22	Benzo(k)Fluoranteno Benzo(a)Pireno Benzo(ghi)Perileno	295	420
23.5	Indeno(1,2,3 cd)Pireno	250	500

## Validación del sistema.

### Linealidad

La tabla 3.2.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de la linealidad del sistema cromatográfico. Los resultados están dentro de los criterios de aceptación del Method 8000b US-EPA.

Tabla 3.2.2 Resultados de la evaluación de linealidad del sistema

Analito	Intervalo de calibración	Factor de respuesta	% DER Factor de respuesta	Coefficiente de correlación
Naftaleno	0.093-0.750	4.1	6.7	0.999
Acenafteno	0.093-0.750	1.2	2.9	0.999
Fluoreno	0.093-0.750	3.9	6.3	0.999
Fenantreno	0.093-0.750	3.2	1.5	0.999
Antraceno	0.093-0.750	1.1	0.6	0.999
Fluoranteno	0.093-0.750	6.8	1.8	0.999
Pireno	0.187-1.125	7.1	12.0	0.998
Benzo(a)Antraceno	0.093-0.750	2.9	4.8	0.999
Criseno	0.093-0.750	2.7	4.7	0.999
Benzo(b)Fluoranteno	0.093-0.750	4.8	1.5	0.999
Benzo(k)Fluoranteno	0.093-0.750	1.8	0.3	0.998
Benzo(a)Pireno	0.093-0.750	1.9	0.5	0.999
Benzo(ghi)perileno	0.093-0.750	5.2	2.5	0.999
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	0.093-0.750	15.7	2.4	0.999

## Precisión y exactitud

En la tabla 3.2.3 se presenta un resumen de los resultados de la evaluación de la precisión y exactitud instrumental se observa que los resultados cumplen con los criterios de aceptación.

Tabla 3.2.3 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud instrumental.

<b>Analito</b>	<b>Intervalo calibración µg/mL</b>	<b>% DER</b>	<b>% Error promedio</b>
Naftaleno	0.093-0.750	8.1	0.9
Acenafteno	0.093-0.750	7.2	0.9
Fluoreno	0.093-0.750	7.0	0.3
Fenantreno	0.093-0.750	8.4	0.7
Antraceno	0.093-0.750	7.8	0.3
Fluoranteno	0.093-0.750	7.0	0.6
Pireno	0.187-1.1250	7.8	3.3
Benzo(a)Antraceno	0.093-0.750	7.6	0.4
Criseno	0.093-0.750	7.0	0.4
Benzo(b)Fluoranteno	0.093-0.750	7.5	0.5
Benzo(k)Fluoranteno	0.093-0.750	8.2	0.2
Benzo(a)Pireno	0.093-0.750	9.0	0.5
Benzo(ghi)perileno	0.093-0.750	5.9	0.6
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	0.093-0.750	7.7	0.8

### Límite de detección y límite de cuantificación

Los resultados de la evaluación del límite de detección y cuantificación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.2.4 Resultados de límite de detección y límite de cuantificación del sistema

<b>Analito</b>	<b>LOD (ng/mL)</b>	<b>S/N</b>	<b>LOQ (ng/mL)</b>	<b>% DER</b>
Naftaleno	46.8	299	93.7	6.2
Acenafteno	46.8	1980	93.7	7.6
Fluoreno	46.8	505	93.7	6.6
Fenantreno	46.8	636	93.7	7.7
Antraceno	46.8	149	93.7	7.8
Fluoranteno	46.8	6	93.7	7.1
Pireno	93.7	4	187	9.1
Benzo(a)Antraceno	46.8	135	93.7	7.5
Criseno	46.8	203	93.7	6.3
Benzo(b)Fluoranteno	46.8	108	93.7	7.7
Benzo(k)Fluoranteno	46.8	878	93.7	8.0
Benzo(a)Pireno	46.8	431	93.7	9.1
Benzo(ghi)perileno	46.8	156	93.7	5.1
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	46.8	10	93.7	7.3

## Validación del método

### Linealidad

Los resultados de la linealidad del método se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.2.5 Resultados de la evaluación linealidad del método

Analito	Rango calibración ng/mL	Factor de respuesta	% DER factor de respuesta	Coefficiente correlación
Naftaleno	156–625	4.3	5.5	0.992
Acenafteno	156–625	1.6	8.5	0.996
Fluoreno	156–625	4.5	5.4	0.995
Fenantreno	156–625	3.7	8.9	0.996
Antraceno	156–625	1.3	8.7	0.996
Fluoranteno	156–625	8.0	7.6	0.995
Pireno	156–625	4.5	5.5	0.995
Benzo(a)Antraceno	156–625	3.7	6.8	0.995
Criseno	156–625	3.3	7.4	0.996
Benzo(b)Fluoranteno	156–625	5.8	8.8	0.996
Benzo(k)Fluoranteno	156–625	2.2	8.7	0.995
Benzo(a)Pireno	156–625	2.2	9.5	0.995
Benzo(ghi)perileno	156–625	3.7	8.9	0.996
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	156–625	1.3	8.7	0.996

### **Precisión y exactitud a condiciones de repetibilidad.**

Tabla 3.2.6 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud del método a condiciones de repetibilidad

<b>Analito</b>	<b>Precisión % DER</b>	<b>Exactitud % Error</b>
Naftaleno	4.6	9.8
Acenafteno	3.4	8.4
Fluoreno	3.3	5.4
Fenantreno	3.6	8.8
Antraceno	3.7	10.8
Fluoranteno	5.2	12.2
Pireno	10.5	15.6
Benzo(a)Antraceno	3.1	6.7
Criseno	3.5	10.3
Benzo(b)Fluoranteno	3.5	13.9
Benzo(k)Fluoranteno	3.7	7.8
Benzo(a)Pireno	3.7	8.6
Benzo(ghi)perileno	3.9	8.9
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	14.5	11.8

### **Precisión exactitud a condiciones de repetibilidad**

Tabla 3.2.7 Resultados de la evaluación de precisión y exactitud a condiciones de repetibilidad.

Analito	Precisión % DER	Exactitud % Error
Naftaleno	9.6	6.6
Acenafteno	15.6	15.5
Fluoreno	3.2	7.1
Fenantreno	7.7	2.3
Antraceno	4.2	5.2
Fluoranteno	4.5	5.1
Pireno	13.9	7.5
Benzo(a)Antraceno	3.5	5.1
Criseno	5.6	5.4
Benzo(b)Fluoranteno	4.3	5.1
Benzo(k)Fluoranteno	5.2	5.0
Benzo(a)Pireno	4.6	5.5
Benzo(ghi)perileno	7.9	7.8
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	8.4	19.5

### Exactitud como % Recuperación

Tabla 3.2.8 Resultados de la evaluación de exactitud como porcentaje de recuperación.

<b>Analito</b>	<b>% R</b>
Naftaleno	100
Acenafteno	80
Fluoreno	91
Fenantreno	81
Antraceno	82
Fluoranteno	83
Pireno	91
Benzo(a)Antraceno	86
Criseno	84
Benzo(b)Fluoranteno	83
Benzo(k)Fuoranteno	82
Benzo(a)Pireno	83
Benzo(ghi)Perileno	80
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	85

## Limite de cuantificación y limite de detección

Tabla 3.2.9 Resultados de la evaluación del limite de detección y cuantificación del método.

Analito	LOD ng/mL	S/N	LOQ ng/mL	% DER
Naftaleno	78	3	156	12.8
Acenafteno	78	17	156	9.0
Fluoreno	78	37	156	6.0
Fenantreno	78	10	156	7.6
Antraceno	78	23	156	8.2
Fluoranteno	78	14	156	10.2
Pireno	78	5	156	18.3
Benzo(a)Antraceno	78	34	156	12.2
Criseno	78	31	156	10.0
Benzo(b)Fluoranteno	78	23	156	8.8
Benzo(k)Fluoranteno	78	47	156	8.5
Benzo(a)Pireno	78	44	156	8.8
Benzo(ghi)perileno	78	11	156	12.2
Indeno(1,2,3 cd)Pireno	78	20	156	15.7

### Objetivo 3.- Análisis de muestras reales

Utilizando el método validado se identificaron y cuantificaron 6 PAH's, estos fueron: Benzo(a)Antraceno, Criseno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(k)Fluoranteno, Benzo(a)Pireno y Benzo(ghi)Perileno. En la figura 3.3.1 se presentan los cromatogramas empalmados de una muestra real, una mezcla estándar de 14 PAH's, y un blanco sometidos a todo el proceso de análisis.

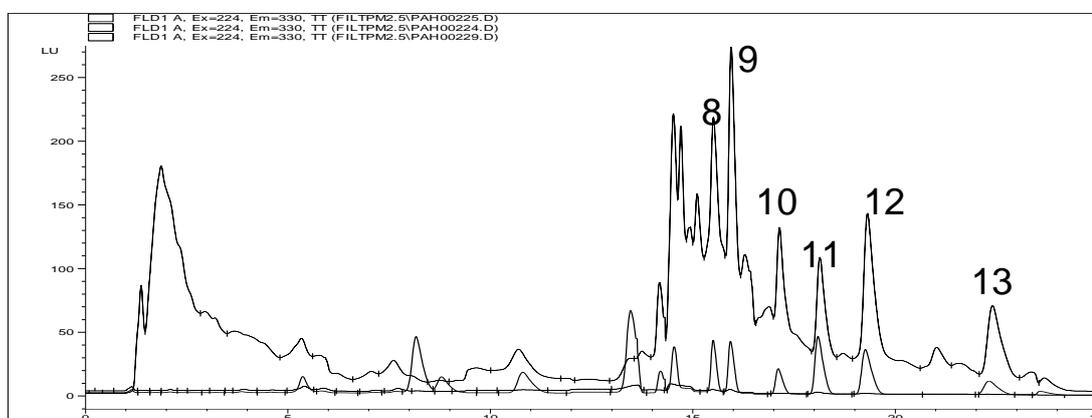


Figura 3.3.1. Cromatograma de muestra, estándar y blanco

..... Muestra real  
 \_\_\_\_\_ Estándar 14 PAH's  
 ----- Blanco

Tabla 3.3.1.- Principales PAH's encontrados en las muestras de partículas PM2.5

Pico	Analito
8	Benzo(a)Antraceno
9	Criseno
10	Benzo(b)Fluoranteno
11	Benzo(k)Fluoranteno
12	Benzo(a)Pireno
13	Benzo(ghi)Perileno

### **Niveles de PAH's**

En la tabla 3.3.2 se presentan los resultados del análisis de PHA's en las muestras de PM2.5 obtenidas en la zona 1. Los PAH's identificados en todas las muestras fueron B(a)A, Criseno, B(b)F, B(k)F, B(a)P y B(ghi)P. Los primeros 5 se cuantificaron en los meses de Otoño-Invierno. El B(ghi)P se cuantifico en todos los meses.

En la tabla 3.3.3 se presentan los resultados del análisis de PHA's en las muestras de PM2.5 obtenidas en la zona 2. Los PAH's identificados en todas las muestras fueron B(a)A, Criseno, B(b)F, B(k)F, B(a)P y B(ghi)P. Los primeros 5 se cuantificaron en los meses de Otoño-Invierno. El B(ghi)P se cuantifico en todos los meses.

Tabla 3.3.2.- Niveles de PAH's en las partículas PM2.5 zona 1 (ng/m3)

Fecha	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P	PAH's Tot
27/02/08	0.23	0.32	0.21	0.15	0.2	0.07	1.18
04/03/08	0.36	0.43	0.26	0.2	0.35	1.01	2.61
10/03/08						0.64	0.64
16/03/08			0.24			0.28	0.52
22/03/08						0.22	0.22
28/03/08						0.15	0.15
03/04/08		0.48	0.56	0.41	0.64	1.01	3.1
09/04/08						0.26	0.26
15/04/08							
21/04/08						0.12	0.12
27/04/08						0.26	0.26
03/05/08							
09/05/08						0.26	0.26
15/05/08						0.42	0.42
21/05/08						0.23	0.23
27/05/08							
02/06/08							
08/06/08						0.51	0.51
14/06/08						0.18	0.18
20/06/08						0.13	0.13
26/06/08						0.05	0.05
02/07/08							
10/07/08						0.11	0.11
14/07/08						0.1	0.1
20/07/08							
26/07/08						0.09	0.09
01/08/08						0.13	0.13
07/08/08							
13/08/08							
20/08/08						0.15	0.15
02/09/08	0.1	0.1					0.2
06/09/08							
12/09/08					0.28	0.35	0.63
18/09/08					0.09	0.13	0.22
26/09/08	0.28	0.3			0.28	0.37	1.23
30/09/08	0.26	0.29	0.28	0.21	0.41	0.72	2.17
06/10/08						0.27	0.27
18/10/08	0.21	0.23			0.22	0.18	0.84
24/10/08	0.39	0.39	0.35	0.25	0.37		1.75
30/10/08						0.22	0.22
05/11/08	0.25	0.28	0.29		0.45	0.65	1.92
11/11/08	0.25	0.31	0.22	0.15	0.24	0.22	1.39
17/11/08	0.35	0.37	0.26		0.33	0.2	1.51
23/11/08		0.19				0.21	0.4
29/11/08				0.16		0.14	0.3
04/12/08	0.39	0.39	0.32	0.26	0.43	0.44	2.23
11/12/08	1.11	0.99	0.67	0.55	1.47	0.96	5.75
17/12/08	0.97	1.3	1.07	0.81	1.33	1.45	6.93
23/12/08	1.01	0.87	0.76	0.63	1.52	1.74	6.53
29/12/08	0.36	0.36	0.32	0.52	0.39	0.38	2.33
04/01/09	0.11	0.16	0.15	0.22	0.16	0.07	0.87
10/01/09						0.17	0.17
18/01/09	0.74	0.84	0.5	0.4	0.72	0.57	3.77
22/01/09	0.58	0.56	0.43	0.34	0.72	1.08	3.71
28/01/09	0.32	0.59	0.39	0.25	0.29	0.35	2.19
03/02/09	0.49	0.58	0.54	0.32	0.53		2.46
09/02/09	0.41	0.42	0.28	0.22	0.4	0.56	2.29
15/02/09			0.13		0.07	0.12	0.32
22/02/09	0.19	0.22	0.16		0.15	0.23	0.95
27/02/09	0.17	0.17	0.18	0.15	0.29	0.29	1.25

Tabla 3.3.3.- Niveles de PAH's en las partículas PM2.5 de la zona 2 (ng/m3)

Fecha	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P	PAH's Tot
27/02/08	0.63	0.6	0.33	0.27	0.54	0.25	2.62
04/03/08	0.62	0.61	0.33	0.28	0.61	0.54	2.99
10/03/08						0.24	0.24
16/03/08		0.25	0.68	0.17	0.24	0.28	1.62
22/03/08		0.37	0.27	0.38		0.31	1.33
28/03/08		0.32			0.28	0.34	0.94
03/04/08	0.54	0.65	0.64	0.56	0.88	1.4	4.67
09/04/08		0.3			0.35	0.47	1.12
15/04/08	0.34	0.22				0.27	0.83
21/04/08						0.11	0.11
27/04/08							
03/05/08							
09/05/08						0.5	0.5
15/05/08						0.44	0.44
21/05/08		0.35	0.3		0.32	0.47	1.44
27/05/08						0.19	0.19
02/06/08						0.14	0.14
08/06/08						0.13	0.13
14/06/08						0.07	0.07
20/06/08						0.24	0.24
26/06/08						0.11	0.11
02/07/08							
10/07/08		0.17			0.18	0.2	0.55
14/07/08						0.18	0.18
20/07/08							
26/07/08						0.19	0.19
01/08/08						0.14	0.14
07/08/08	0.1	0.12	0.12			0.13	0.47
13/08/08	0.2	0.23			0.24	0.22	0.89
20/08/08							
02/09/08	0.15	0.17				0.18	0.5
06/09/08							
12/09/08	0.15	0.18		0.13	0.2	0.36	1.02
18/09/08	0.21	0.21	0.16		0.23	0.32	1.13
26/09/08	0.29	0.29	0.21		0.33	0.44	1.56
30/09/08	0.29	0.26	0.18		0.33	0.43	1.49
06/10/08	0.21	0.22	0.17	0.13	0.23	0.31	1.27
18/10/08	0.3	0.28	0.27		0.31		1.16
24/10/08	0.59	0.61	0.58	0.44	0.91	0.88	4.01
30/10/08	0.25	0.28	0.28	0.21	0.31	0.41	1.74
05/11/08	0.29	0.28	0.25		0.39	0.26	1.47
11/11/08	0.21	0.24	0.2		0.23	0.18	1.06
17/11/08	0.59	0.54	0.4	0.32	0.66	0.79	3.3
23/11/08							
29/11/08	0.21	0.24	0.2	0.17	0.23	0.17	1.22
04/12/08	0.19	0.19			0.17	0.14	0.69
11/12/08	1.69	1.27	0.81	0.67	1.59	1.21	7.24
17/12/08	0.56	0.71	0.53	0.39	0.63	0.99	3.81
23/12/08	0.78	0.6	1.39	1.15	2.8	2.42	9.14
29/12/08	0.71	0.62	0.42	0.35	0.77	0.76	3.63
04/01/09							
10/01/09	0.11	0.13	0.12	0.09	0.13	0.22	0.8
18/01/09	0.72	0.7	0.51	0.44	0.91	0.79	4.07
22/01/09	0.78	0.64	0.53	0.46	1.15	0.95	4.51
28/01/09	0.4	0.4	0.26	0.19	0.35	0.44	2.04
03/02/09	0.92	0.83	0.62	0.49	1.14	0.96	4.96
09/02/09	0.33	0.27	0.19	0.15	0.32		1.26
15/02/09					0.16	0.2	0.36
22/02/09	0.34	0.3			0.27	0.38	1.29
27/02/09	0.18	0.19	0.21	0.16	0.32	0.47	1.53

La concentración total de la suma de los 6 PAH's cuantificados en las PM2.5 vario entre 0.05 y 9.14 ng/m<sup>3</sup>. En la zona 1 el promedio fue de 1.30 ng/m<sup>3</sup> con un rango de 0.05 – 6.93 ng/m<sup>3</sup>, mientras que en la zona 2 fue de 1.70 ng/m<sup>3</sup> con un rango de 0.07 – 9.14 ng/m<sup>3</sup> (Tabla 3.3.4).

Tabla 3.3.4. Estadística descriptiva PAH's totales.

Zona	N	Mínimo	Máximo	Media	SD
1	51	0.05	6.93	1.30	1.64
2	52	0.07	9.14	1.70	1.88

En la figura 3.3.2 se observa el comportamiento temporal de los PAH's totales. Los meses de Otoño-Invierno mostraron las concentraciones más altas mientras que los meses de Primavera-Verano los más bajos.

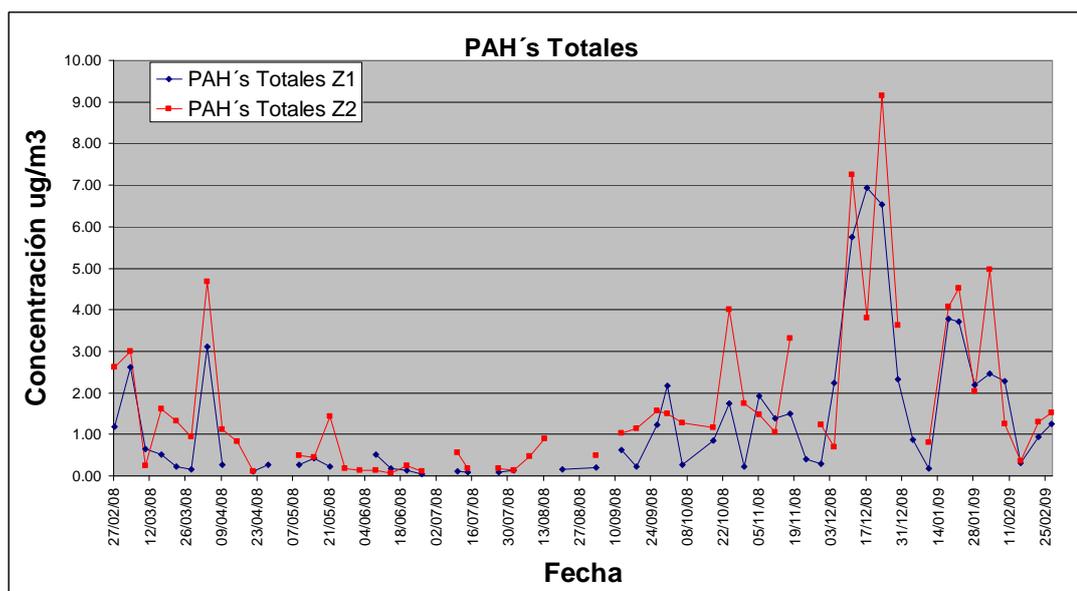


Figura 3.3.2 Niveles de PAH's totales durante el periodo de muestreo.

En la figura 3.3.3 se muestra el comportamiento temporal de los 6 PAH's cuantificados. Los compuestos más abundantes en ambas zonas fueron el B(ghi)perileno y el B(a)Pireno. El PAH's menos abundante en ambas zonas fue el Benzo(k)Fluoranteno.

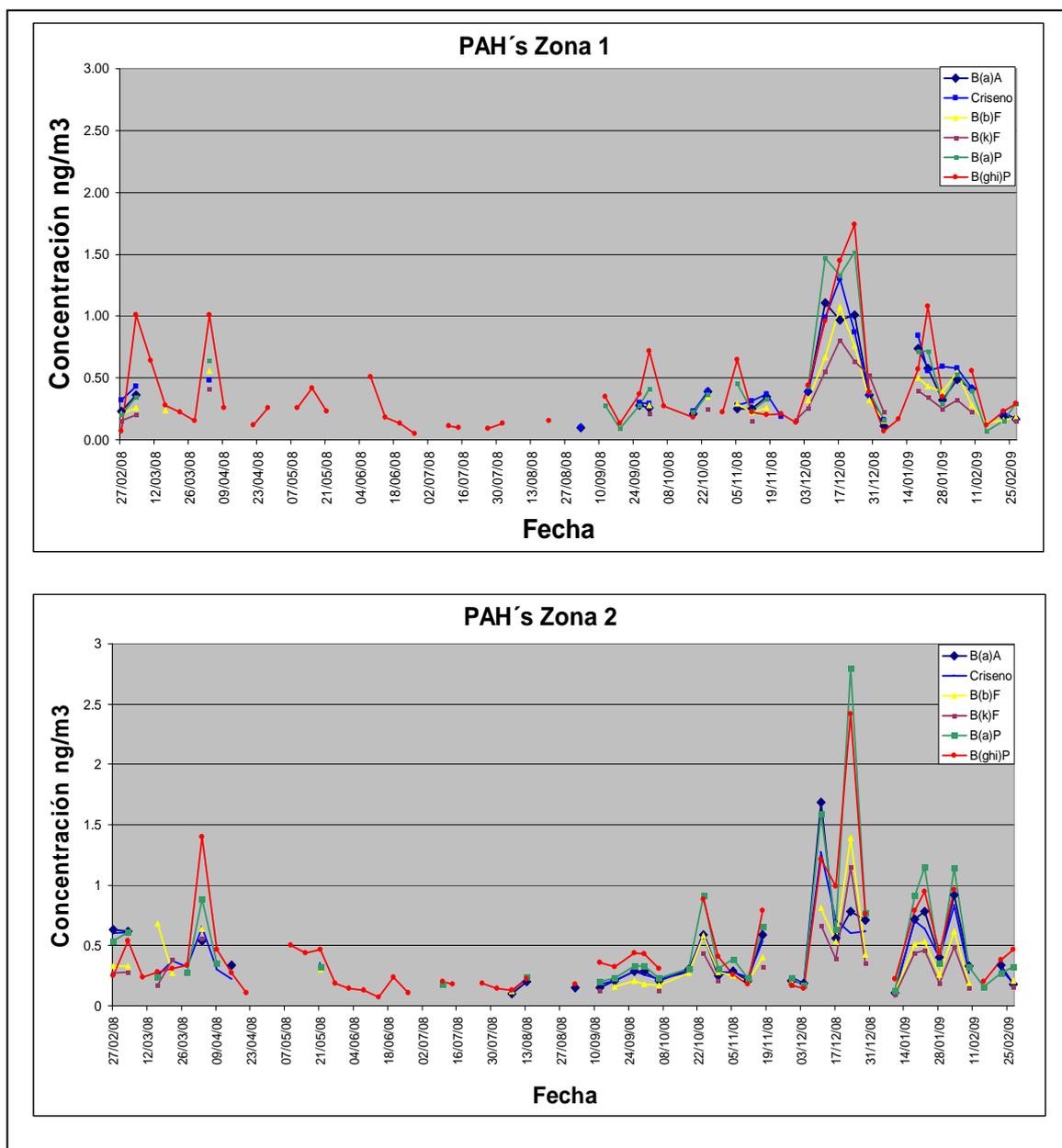


Figura 3.3.3. Niveles de PAH's en ambas zonas.

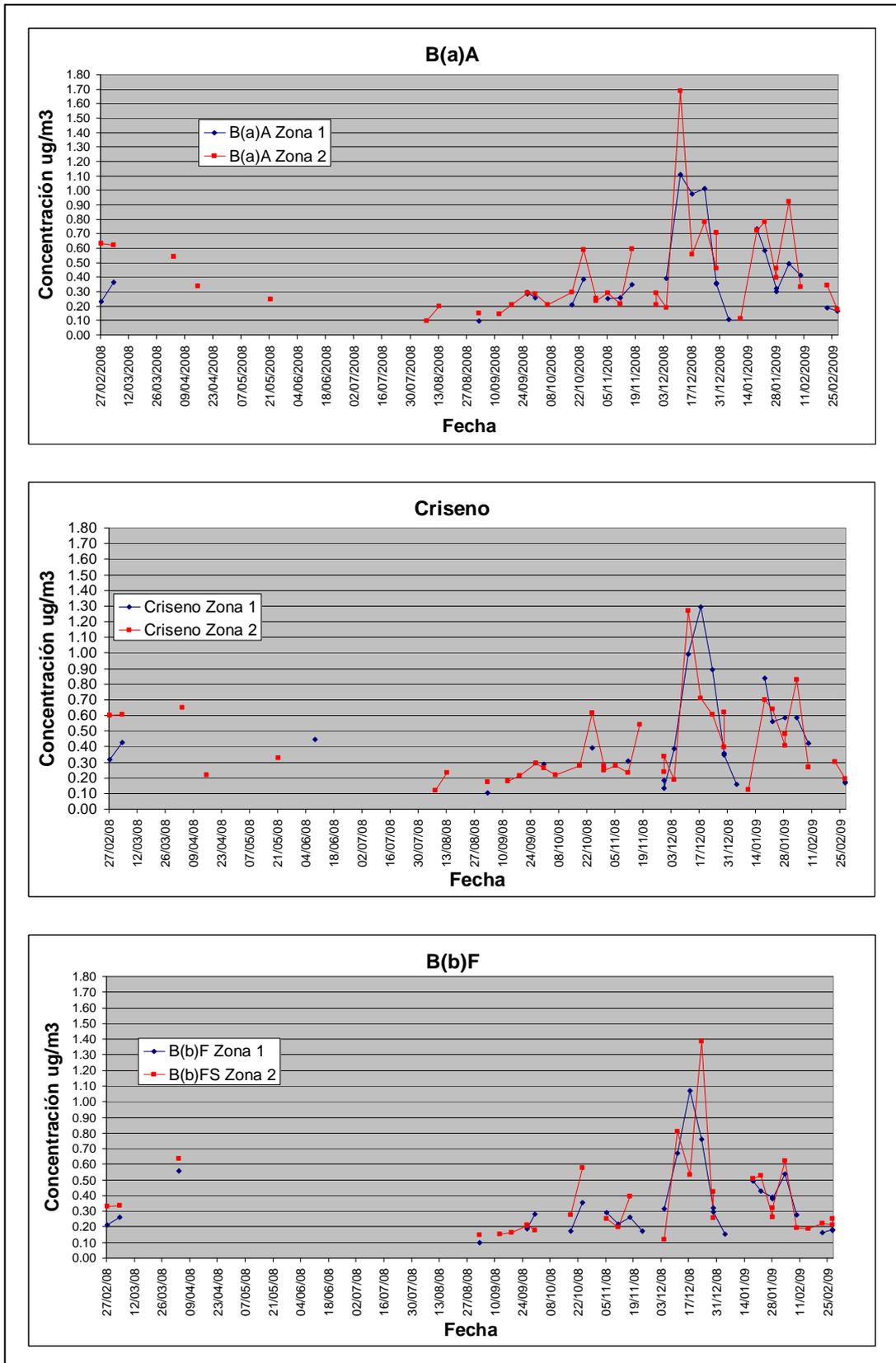


Figura 3.3.4. Serie temporal de B(a)A, Criseno y B(b)F en ambas zonas

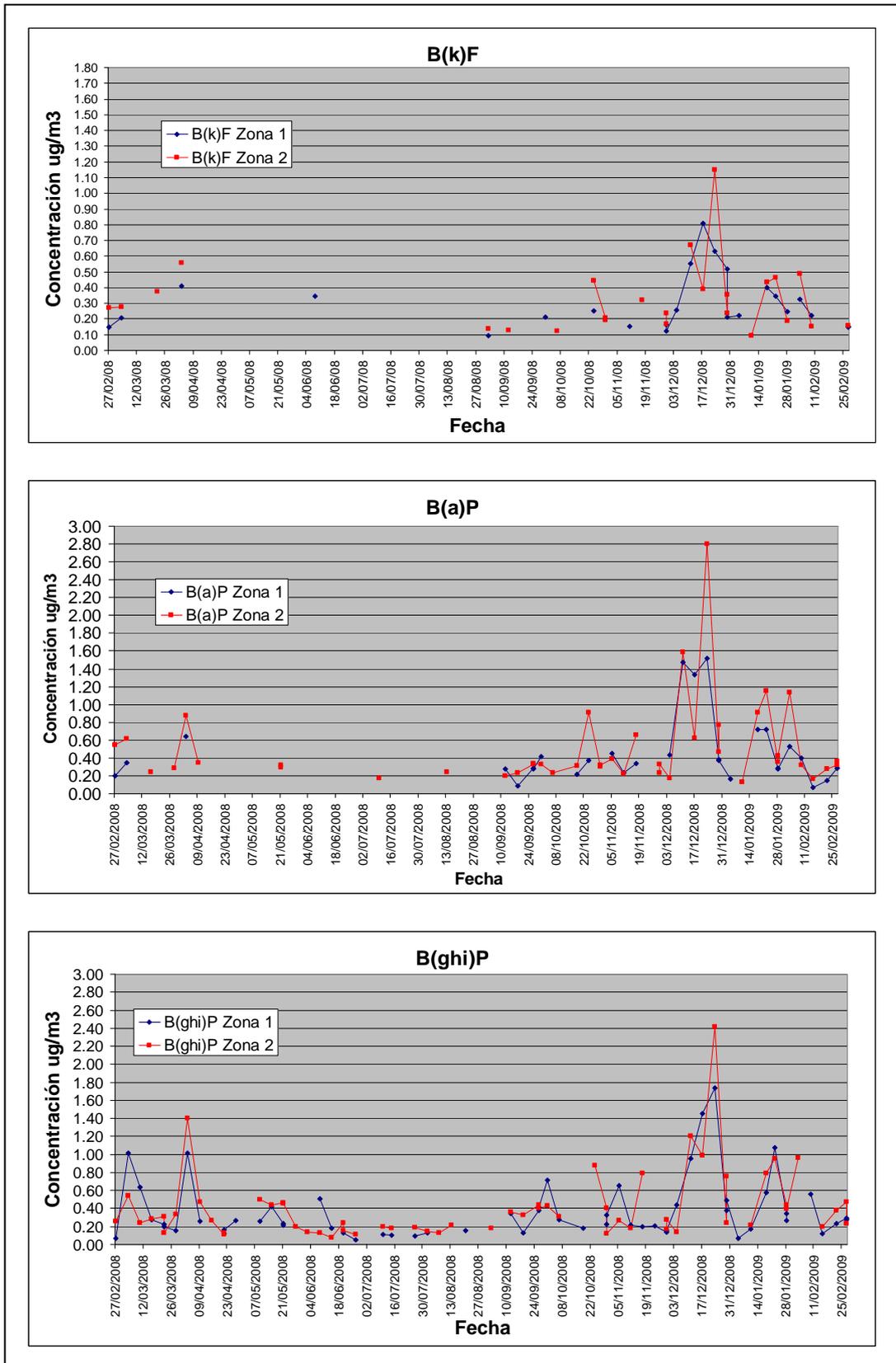


Figura 3.3.5. Serie temporal de B(k)F, B(a)P y B(ghi)P en ambas zonas

En la tabla 3.3.2 se presentan los promedios mensuales validos de los PAH's cuantificados en las muestras de partículas PM2.5 de la zona 1. El B(ghi)P se cuantifico en casi todos los meses excepto en agosto donde los datos fueron insuficientes. B(a)A, Criseno, B(b)F, B(K)F, B(a)P se cuantificaron en su mayoría en los meses de invierno.

Tabla 3.3.2. Promedio mensual de cada PAH's (ng/m<sup>3</sup>) cuantificado en la zona 2.

Santa Catarina						
Mes	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P
Mar-08		0.39				0.34
Abr-08						0.56
May-08						0.40
Jun-08						0.14
Jul-08						
Ago-08						0.16
Sep-08	0.22	0.22				0.35
Oct-08	0.34	0.35	0.33	0.26	0.44	0.53
Nov-08	0.33	0.33	0.26		0.38	0.35
Dic-08	0.79	0.68	0.79	0.64	1.19	1.10
Ene-09	0.50	0.47	0.36	0.30	0.64	0.60
Feb-09	0.44	0.40			0.44	0.50

En la tabla 3.3 se presentan los promedios mensuales validos de los PAH's cuantificados en las muestras de partículas PM2.5 de la zona 2. El B(ghi)P al igual que en la zona 1 se cuantifico en casi todos los meses de muestreo, excepto en julio donde los datos fueron insuficientes para. B(a)A, B(b)F, B(k)F y B(a)P se identificaron y cuantificaron en los meses de otoño-invierno.

Tabla 3.3.3. Promedio mensual (ng/m<sup>3</sup>) de cada PAH's cuantificado en la zona 2

Cardiología						
Mes	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P
Mar-08						0.46
Abr-08						0.41
May-08						0.30
Jun-08						0.22
Jul-08						0.10
Ago-08						
Sep-08					0.27	0.39
Oct-08						0.23
Nov-08		0.29				0.28
Dic-08	0.77	0.78	0.63	0.55	1.03	0.99
Ene-09	0.44	0.54	0.37	0.30	0.47	0.45
Feb-09	0.32	0.35	0.26		0.29	0.30

En cuanto a los niveles individuales de los 6 PAH's que fueron cuantificados, el análisis de varianza bajo un diseño bloques al azar, tomando como bloque cada día de las mediciones, indica diferencia altamente significativa entre períodos (días); mientras que la diferencia entre la zona 1 y 2, también resultó altamente significativa.

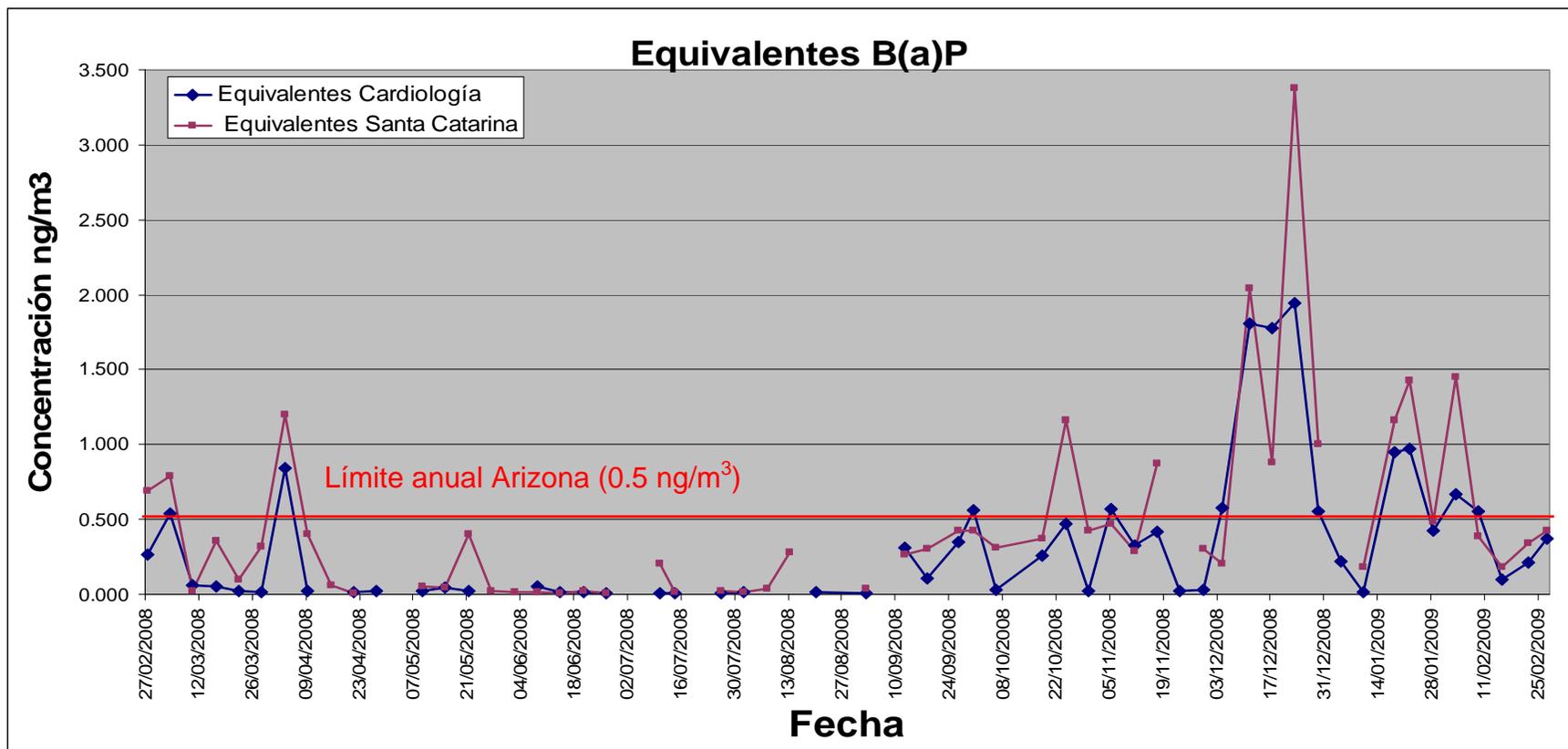
En las tablas 3.3.6 y 3.3.7 se muestran los resultados promedio mensual de los equivalentes de B(a)P de cada PAH's cuantificados. La suma total de B(a)Peq en la zona 1 son superiores al límite de Arizona USA ( $0.5 \text{ ng/m}^3$ ) en los meses de Noviembre y Diciembre mientras que en la zona 2 son superiores en los meses de Octubre, Diciembre, Enero y Febrero.

Tabla 3.3.6 Resultados de B(a)Peq Zona 1

Mes	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P	<b>B(a)Peq Tot</b>
Mar-08						0.05	<b>0.05</b>
Abr-08						0.04	<b>0.04</b>
May-08						0.03	<b>0.03</b>
Jun-08						0.02	<b>0.02</b>
Jul-08						0.01	<b>0.01</b>
Ago-08							
Sep-08					0.27	0.04	<b>0.30</b>
Oct-08						0.02	<b>0.02</b>
Nov-08		0.00				0.03	<b>0.03</b>
Dic-08	0.08	0.01	0.06	0.06	1.03	0.10	<b>1.33</b>
Ene-09	0.04	0.01	0.04	0.03	0.47	0.04	<b>0.63</b>
Feb-09	0.03	0.00	0.03		0.29	0.03	<b>0.38</b>

Tabla 3.3.7. Resultados de B(a)Peq Zona 2

Mes	B(a)A	Criseno	B(b)F	B(k)F	B(a)P	B(ghi)P	<b>B(a)Peq Tot</b>
Mar-08		0.00				0.03	<b>0.04</b>
Abr-08						0.06	<b>0.06</b>
May-08						0.04	<b>0.04</b>
Jun-08						0.01	<b>0.01</b>
Jul-08							
Ago-08						0.02	
Sep-08	0.02	0.00				0.03	<b>0.06</b>
Oct-08	0.03	0.00	0.03	0.03	0.44	0.05	<b>0.59</b>
Nov-08	0.03	0.00	0.03		0.38	0.04	<b>0.47</b>
Dic-08	0.08	0.01	0.08	0.06	1.19	0.11	<b>1.53</b>
Ene-09	0.05	0.00	0.04	0.03	0.64	0.06	<b>0.81</b>
Feb-09	0.04	0.00			0.44	0.05	<b>0.54</b>



Zona	N	Mínimo	Máximo	Media	SD
1	51	0.00	1.94	0.3278	0.4667
2	52	0.01	3.38	0.468	0.6098

Figura 3.3.6. Serie temporal de B(a)Peq en ambas zonas.

### Estimación de las fuentes de PAH's

Los resultados de radios diagnósticos para estimar las probables fuentes de PAH's en las zonas estudiadas del AMM se muestran en las tablas 3.3.8. Los resultados de los radios de  $B(\text{ghi})P/B(\text{a})P$ ,  $B(\text{a})/[B(\text{a})A+\text{Cri}]$  y  $B(\text{a})P/[B(\text{a})P+\text{Cri}]$  indican que las probables fuentes de PAH,s en las zonas estudiadas son los vehículos automotores. El resultado del radio de  $[B(\text{b})F+B(\text{k})F]/B(\text{ghi})P$  indica que las fuentes industriales contribuyen poco a la generación de PAH's.

Tabla 3.3.8 Resultados de los radios diagnósticos para emisiones de PAH's.

Radio	Zona		Valores de referencia				
	1	2	Gasolina	Diesel	Madera	Carbón	Industria
$B(\text{ghi})P/B(\text{a})P$	1.20	1.12	2.5-3.3	1.2-2.2			
$B(\text{a})P/B(\text{ghi})P$	1.03	1.00	0.30-0.44			0.90-6.6	
$[B(\text{b})F+B(\text{k})F]/B(\text{ghi})P$	1.49	1.18			2.18	-	7.10-11.20
$B(\text{a})A/[B(\text{a})A+\text{Cri}]$	0.47	0.51	0.76	0.73	0.43	0.50-0.55	-
$B(\text{a})P/[B(\text{a})P+\text{Cri}]$	0.56	0.57	0.73	0.49			

## Capítulo IV

### Discusión

En este proyecto se monitorearon los niveles de PM<sub>2.5</sub> en la zona suroeste (Santa Catarina) y el cruce de las avenidas Madero y Gonzalitos (Centro). La primera representando una zona con potencial exposición industrial y la segunda representando una zona de alto tráfico vehicular. Así mismo se cuantificaron los niveles de Naftaleno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno, Criseno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Benzo(ghi)perileno e Indeno(1,2,3 cd)pireno en las PM<sub>2.5</sub>.

Con respecto a los niveles de PM<sub>2.5</sub>, la normatividad mexicana establece que el promedio anual no debe ser mayor a 15 µg/m<sup>3</sup> (44). Nuestros resultados muestran que en ambas zonas se rebasó el límite máximo permisible para el promedio anual. Diciembre fue el mes que presentó los niveles más altos de partículas PM<sub>2.5</sub> y fue este mes en el que ambas zonas rebasaron el límite de 65 µg/m<sup>3</sup> una vez al año. La zona 1 excedió el límite en una ocasión y la zona 2 lo excedió en 2 ocasiones. Estos niveles pudieron deberse al alto congestionamiento vehicular causado por las compras navideñas, la pirotecnia utilizada en las festividades propias del mes y el cambio en las condiciones meteorológicas como menor velocidad del viento. El viento dispersa y facilita la limpieza de contaminantes en el aire incluido las PM<sub>2.5</sub> por lo que al disminuir su

velocidad disminuye también la dispersión y limpieza de estos contaminantes. En México solo el Distrito Federal y el AMM cuentan con una red de Monitoreo Ambiental. Ambas redes reportaron en 2007 niveles elevados de partículas PM<sub>2.5</sub> que exceden el límite anual promedio de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (45).

El análisis de varianza bajo un diseño bloques al azar, tomando como bloque cada día de las mediciones, indica diferencia altamente significativa entre períodos (días), con un valor de  $p < 0.001$ ; mientras que la diferencia entre la zona 1 y 2 ( $2.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), también resultó altamente significativa, con un valor de  $p = 0.001$ . Datos del SIMA muestran que los niveles de la zona suroeste difieren notablemente con respecto a las otras zonas de monitoreo. La diferencia encontrada en las zonas estudiadas puede ser debida al efecto aditivo del viento. En Monterrey la dirección predominante del viento es de este a oeste lo cual pudo arrastrar los contaminantes de las demás zonas de Monterrey y adicionarse a los contaminantes generados por el tráfico vehicular y las emisiones industriales que hay en la zona suroeste. Es importante recordar también que el municipio de Santa Catarina colinda con el cerro de las mitras y la Sierra Madre Oriental, los cuales actúan como barreras físicas para la dispersión de contaminantes con lo que permitiendo la acumulación de estos.

Los resultados indican que la calidad del aire en el AMM con respecto a PM<sub>2.5</sub> no es la adecuada y deben considerarse seriamente ya que diversos estudios epidemiológicos han mostrado que los incrementos a corto plazo

de tan solo 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  se han asociado a incrementos del 1 % en la mortalidad de la población por todas las causas. Así mismo la exposición a largo plazo incrementa: 1) 6 % el riesgo de mortalidad por causas no accidental por cada 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de aumento en las  $\text{PM}_{2.5}$ . 2) un riesgo aumentado de mortalidad por cáncer pulmonar (15 - 21 % por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 3) causas cardiovasculares (12 – 14 % por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Además el hecho de vivir cerca de una avenida con gran carga vehicular parece estar asociado con elevado riesgo de estos últimos 3 resultados

A la fecha no hay a estudios de mortalidad asociada a incrementos de  $\text{PM}_{2.5}$  en monterrey. Sin embargo podemos suponer que la población está en riesgo de presentar tales efectos adversos dado que los niveles de contaminación por  $\text{PM}_{2.5}$ , obtenidos a través del SIMA desde el año 2003, se han observado consistentemente elevados.

Por otro lado, diversos estudios muestran que la composición química de las partículas varía de un lugar a otro y que la composición de estas pudiera influir de manera importante en los efectos adversos a la salud. Actualmente la legislación mexicana y de otros países se basa solamente en los niveles de partículas ambientales como medida de protección de la población, ignorando la contribución que pudiera tener la composición química de estas en el desarrollo de los efectos adversos. Debido a la multitud de compuestos presentes en las  $\text{PM}_{2.5}$  los estudios de composición química

implican un alto costo económico que no todos los laboratorios pueden mantener.

En el presente estudio se aplicó un método validado por nuestro laboratorio para cuantificar los niveles de 14 de los 17 PAH's que la EPA recomienda monitorear. Durante el periodo de muestreo se detectaron en ambas zonas Benzo(a)Antraceno, Criseno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(k)Fluoranteno, Benzo(a)Pireno, Benzo(ghi)Perileno, Naftaleno, Acenafteno y Antraceno. Estos últimos 3 a niveles inferiores al límite de cuantificación del método. La mayor concentración de los primeros 6 PAH's se obtuvo en los meses de invierno para la zona 1 y de otoño-invierno para la zona 2. En el mes de diciembre se registraron los niveles mas elevados de PAH's en ambas zonas. Entre los factores que pueden contribuir a la elevación de PAH's se encuentran: la deficiente dispersión y limpieza de las PM2.5 debida a una menor velocidad del viento y la menor degradación de PAH's causada por la menor radiación solar de los meses de invierno.

Estos resultados concuerdan con otros estudios en los que también se observa la abundancia de estos PAH's en las PM2.5. Cabe recordar que los 6 PAH's cuantificados son los que están más asociados al desarrollo de cáncer pulmonar.

Actualmente no hay legislación que establezca un límite para cada uno de los PAH's en el aire. Algunos organismos como la Comunidad Europea recomiendan que el promedio anual de PAH's totales como equivalentes de

B(a)P no debe ser mayor a **0.7 ng/m<sup>3</sup>** (25). El estado de Arizona en EU recomienda que los niveles de equivalentes de B(a)P no sean mayores a **0.5 ng/m<sup>3</sup>** como promedio anual (17). Nuestros resultados muestran que durante el periodo en el que se registró el mayor contenido de los 6 PAH's, el promedio de la suma de equivalentes de B(a)P rebasa el límite de Arizona (Cardiología = 0.56 ng/m<sup>3</sup> y Santa Catarina = 0.59 ng/m<sup>3</sup>).

Los valores de PAH's totales expresados como ng/m<sup>3</sup> o como equivalentes de B(a)P deben considerarse seriamente ya que como se indicó anteriormente rebasan los límites regulatorios de EUA y la comunidad esta expuesta a PAH's tan solo por el hecho de vivir en la zonas caracterizadas (Santa Catarina y el cruce de las avenidas Gonzálitos y Madero). Es probable que también las demás zonas cercanas a vías con alto tráfico vehicular estén expuestas a estos niveles por lo que es necesario extender estos estudios a otras zonas para confirmarlo o descartarlo.

El análisis de radios de PAH's para estimar la contribución de las fuentes indica, que con mucha probabilidad, los automóviles son la principal fuente emisora de PAH's de ambas zonas. La zona 2, a pesar de ser potencialmente industrial, también posee una carga vehicular considerable debido a que en esta zona se encuentra la carretera rumbo a Saltillo. Por esta carretera fluyen principalmente vehículos de carga pesada lo cual podría explicar la similitud en los radios de PAH's. Así mismo el arrastre por medio del viento de los PAH's de otras zonas del AMM podría explicar también dicha similitud.

A la fecha este es el primer estudio en el que se cuantifican los niveles de 14 PAH's en las partículas PM2.5 del Área Metropolitana de Monterrey. La investigación en torno a la contaminación ambiental en Monterrey es escasa, se necesitan estudios epidemiológicos de mortalidad y morbilidad que puedan estimar los efectos de las partículas (PM10, PM2.5, PST) en nuestra población. Así mismo es necesario caracterizar y cuantificar otros constituyentes presentes en las partículas PM2.5 (metales, nitro-PAH's, VOC's) que lleven a la identificación del o los principal constituyente causante de los efectos adversos a la salud. Este conocimiento permitirá establecer acciones razonables para limitarán su emisión y por ende protegerán a las personas más sensibles.

El problema de la contaminación ambiental no se limita a una región en particular, su control requiere la acción conjunta de todos por igual tanto a nivel regional, nacional e internacional. Tener conciencia de la magnitud del problema y de lo factible que es revertirlo, así como de tomar medidas desde este momento, disminuirán de algún modo la probabilidad de que se desarrolle, en nuestra comunidad o alguna otra ciudad del mundo, un episodio trágico como el de 1952 en Londres. En este evento, conocido como el gran Smog de Londres, fallecieron 3000 - 4000 personas a causa de los niveles elevados de contaminantes.

## Capítulo V

### Conclusiones

1.- Los niveles de PM<sub>2.5</sub> en las zona 1 y zona 2 del AMM estudiadas son elevados y rebasan el límite anual de 15 µg/m<sup>3</sup> establecido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-1993.

2.- Se detectaron y cuantificaron durante los meses de otoño e invierno en ambas zonas 6 PAH's: Benzo(a)Antraceno, Criseno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(k)Fluoranteno, Benzo(a)Pireno, Benzo(ghi)Perileno.

3.- Tanto en la zona industrial como en la zona urbana de alto tráfico vehicular, los niveles de B(a)P<sub>eq</sub> en los meses de otoño e invierno son superiores al límite de 0.5 ng/m<sup>3</sup> recomendado por US Arizona.

4.- A la fecha este es el primer estudio en México y en Nuevo León en el que se cuantifican PAH,s en las partículas ambientales PM<sub>2.5</sub>.

## **Perspectivas**

1.- Es necesario extender estos estudios a otros componentes químicos como los nitro-PAH's que son igual o inclusive más tóxicos que los PAH's originales así como también a extenderlos a otras zonas del Área Metropolitana de Monterrey.

2.- Se necesita buscar biomarcadores de exposición a los PAH's, como el hidroxipireno en orina o aductos-PAH's de DNA que permitan establecer el grado de exposición.

3.- El estudio de la composición química permitirá identificar el o los compuestos que más influyen en los efectos adversos producidos por las partículas ambientales en el AMM.

## Bibliografía

- 1.- Croxatto Héctor R. Editorial. Ciencia, humanismo y biósfera. Revista Ambiente y Desarrollo.1985. I (2): 9-12.
- 2.- Turk Amos, Turk Jonathan, Wittes T. Janet. Ecología contaminación medio ambiente. McGraw-Hill Interamericana 1997.
- 3.- Seinfeld JH., Pandis SN. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change Wiley-Interscience (1997) ISBN-10: 0471178160
- 4.- Albert LA. Introducción a la Toxicología Ambiental. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. ISBN 9575322333.
- 5.- Künzli N., Tager IB. Air pollution: from lung to heart. Swiss Med Wkly 2005;135:697–702
- 6.- Rosales-Castillo JA., Torres-Meza VM., Olaiz-Fernández G, Borja-Aburto VH. Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. salud pública de méxico. 4(6): 544-55. 2001
- 7.- Mckone TE., Ryan PB., Ozkaynak H. Exposure information in environmental health research: Current opportunities and future directions for particulate matter, ozone, and toxic air pollutants. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology (2009) 19, 30–44
- 8.- Boubel RW., Fox DL., Turner BD., Stern AC. Fundamentals of air pollution. Third edition. Academic Press. ISBN 0-12-118930-9.
- 9.- Lawrence MS. Gallo M V, Denham M. and Ravenscroft. Effects of pollution on human growth and development: An introduction. J. Physiol. Antropol. 25(1): 103-112, 2006.
- 10.- Tze-Ming C, Gokhale J, Shofer S, Ware G. Kushner WG., Outdoor Air Pollution: Particulate Matter Health Effects. The American Journal of the Medical Science. 2007. 333(4) 235-43
- 11.- Brunekreef B., Holgate ST. Air pollution and health. Lancet 2002; 360: 1233–42.

- 12.- Roy M. HarrisonU, Jianxin Yin. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *The Science of the Total Environment* 249\_2000.85]101
- 13.- Donaldson, K., MacNee, W., 2001. Potential mechanism of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution (PM10). *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203, 411– .
- 14.- Bhatnagar A. Heart Disease Environmental Cardiology: Studying Mechanistic Links Between Pollution and Heart Disease *Circ. Res.* 2006;99;692-705
- 15.- Hackley B., Abigail Feinstein A., Jane Dixon J. Air Pollution: Impact on Maternal and Perinatal Health. *Journal of Midwifery & Women's Health.* 2007. 52(5):435-43.
- 16.- Chen H, Goldberg MS, Villeneuve Pj. A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases *Rev Environ Health.* 2008 Oct-Dec;23(4):243-97
- 17.- Suh HH., Bahadori T., Vallarino J., Spengler JD. Criteria Air Pollutants and Toxic Air Pollutants. *Environ Health Perspect* 1 08(suppi 4):625-633 (2000).
- 18.- Ulrich P. Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, 44, 7520 – 7540.
- 19.- Bai N., Khazaei M., Van Eeden SF., Laher I. The pharmacology of particulate matter air pollution-induced cardiovascular dysfunction *Pharmacology & Therapeutics* 113 16–29 (2007)
- 20.- Hernández CL., Tellez Rojo M.M., Sanin Aguirre L.H., Lacasaña NM., Campos A., Romiu I. Relación entre consultas a urgencias por enfermedad respiratoria y contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Salud Pública de México.* 42 (4): 288-97. 2000.
- 21.- Air Quality Criteria Particulate Matter Volume I of II. Environmental Protection Agency. United States October 2004.
- 22.- Dreher, K.L., 2000. Particulate matter physicochemistry and toxicology: in search of causality—a critical perspective. *Inhal. Toxicol.* 12, 45–57.
- 23.- Mastandrea C., Chichizola C, Ludueña B *et al.* Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores Biológicos. 2005. *Acta Bioquím Clín Latinoam;* 39 (1): 27-36

- 24.- Hannigan MP, Cass GR, Penman BW, Crespi CL, Lafleur AL, Busby WF, Thilly WG, Simoneit BRT. Bioassay-directed chemical analysis of Los Angeles airborne particulate matter using a human cell mutagenicity assay. *Environ Sci Technol* 32:3502–3514 (1998).
- 25.- Gundel LA, Daisey JM, de Carvalho LRF, Kado NY, Schuetzle D. Polar organic matter in airborne particles: chemical characterization and mutagenic activity. *Environ Sci Technol* 27:2112–2119 (1993).
26. Lewtas J. Complex mixtures of air pollutants: characterizing the cancer risk of polycyclic organic matter. *Environ Health Perspect* 100:211–218 (1993).
27. Tuoniminen J, Salomaa S, Pyysalo H, Skyttä E, Tikkanen L, Nurmela T, Sorsa M, Pohjola V, Sauri M, Himberg K. Polynuclear aromatic compounds and genotoxicity in particulate and vapor phases of ambient air: effect of traffic, season, and meteorological conditions. *Environ Sci Technol* 22:1228–1234 (1988).
- 28.- Toxicological profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1995.
- 29.- Boström CE., Gerde P., Hanberg A., et al., Cancer Risk Assessment, Indicators, and Guidelines for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Ambient Air. *Environ Health Perspect* 110(suppl 3):451–489 (2002).
- 30.- Dreher, K.L., Jaskot, R.H., Lehmann, J.R., Richards, J.H., McGee, J.K., Ghio, A.J., Costa, D.L., 1997. Soluble transition metals mediate residual oil fly ash induce acute lung injury. *J. Toxicol. Environ. Health* 50, 285–305.
- 31.- Carter, JD., Ghio, A.J., Samet, J.M., Devlin, R.B., 1997. Cytokine production by human airway epithelial cells after exposure to an air pollution particle is metal-dependent. *Toxicol. Appl. Pharm.* 146, 180–188.
- 32.- Jiménez, L.A., Thompson, J., Brown, D.A., Rahman, I., Antonicelli, F., Duffin, R., Drost, E.M., Hay, R.T., Donaldson, K., MacNee, W., 2000. Activation of NFkappaB by PM10 occurs via an iron-mediate mechanism in the absence of IkappaB degradation. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 166, 101–110.
- 33.- Anuario estadístico de Nuevo León 2005 (Spanish) INEGI.
- 34.- Guajardo Alatorre AA. Análisis estratégico del Área Metropolitana de Monterrey. Un diagnostico para el desarrollo. Volumen I. CEDEM. 2002.
- 35.- SIMA. Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de NL. [http://www.nl.gob.mx/?P=med\\_amb\\_mej\\_amb\\_sima](http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima).
- 36.- Method IO-3.2 Determination of metals in ambient particulate matter using Atomic Absorption Spectroscopy (AA). US EPA. 1999

37.- Riley CM, Rosanske TW. Develop and validation of analytical methods. Progress in Pharmaceutical and Biomedical Analysis. Elsevier. 1996.

38.- Determinative Chromatographic Separations; US-EPA Method 8000B; Rev.2 1996.

39.- Eiguereñ-Fernandez A. Miguel AH. Determination of semivolatile and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in SRM 1649 and PM2.5 samples by HPLC-Fluorescence.

40.- Eiguereñ-Fernandez A. Miguel AH., Froines JR., Thurairatnam S., Avol L. Seasonal and Spatial Variation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Vapor-Phase and PM2.5 in Southern California Urban and Rural Communities. Aerosol Science and Technology, 38:447–455, 2004

41.- Method IO-3.1 Selection, preparation and extraction of filter material. US EPA. 1999

42.- Ambient Air Pollution by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Position Paper Annexes. European Communities, 2001.

43.- Davis DL., Bell ML., Fletcher T. A look back at the London smog of 1952 and the half century since. Environ Health Perspect. 2002. 110(12): A734.

44.- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado.

45.- Informe de la calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México. Estado y Tendencia 1990-2007. Secretaria del medio ambiente del gobierno del Distrito federal 2008.

46.- Tay Joo Hui, Tan Hock Seng, Mhd Radzi Abas, Norhayati Mohd Tahir. Distribution and Health risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH's) in smoke aerosols from burning of selected garden wastes. The Malaysian Journal of Analytical Sciences, Vol 12, No 2 (2008): 357 – 366.

47.- Kishikawa N., Ihara A., Shirota M., et al. Retrospective analysis of atmospheric polycyclic and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons in an industrial area of a western site of Japan. Analytical Sciences. 21: 1467-70

48.-Marchand N., Besombes J L., Chevron N. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the atmospheres of two French alpine valleys: sources and temporal patterns. Atmos. Chem. Phys., 4, 1167–1181, 2004

49.- Lorena Quiterio S., Arbilla G., Favilla Bauerfeldt G., and Costa Moreira J. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and their Molecular Diagnostic Ratios

in Airborne Particles (PM10) Collected in Rio de Janeiro, Brazil. *Water Air Soil Pollut* (2007) 179:79-92.

50.- Marques FCSL, Arbilla G, Quiterio SL., Machado MCS. Particle-Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Region of Rio de Janeiro, Brazil, with Industrial and Traffic Emissions. *J.Braz.Chem.Soc.* (2009) 20(3):518-29

51.- X L Zhang, Tao S, Liu WX, Yang Y, [Zuo Q](#), Liu S Z. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: a multimedia approach. *Environ. Sci. Technol.* (2005) 39 (23): 9109–9114

52.- Li-bin' L., Yan' Liu, Jin-ming's L., Ning T., Kazuichi H., Tsuneaki M. Development of analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in airborne particulates: A review. *Journal of Environmental Sciences* (2007) 19: 1-1 1

53.- Ryno M., Rantanen L., Papaioannou E., Konstandopoulos AG., Koskentalo T. Savela K. Comparison of pressurized fluid extraction, Soxhlet extraction and sonication for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air and diesel exhaust particulate matter : *J. Environ. Monit.*, 2006, 8, 488–493.

54.- Lintelmann J., Fischer K., Karg E. Determination of selected polycyclic aromatic hydrocarbons and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol samples by high-performance liquid chromatography and liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem* (2005) 381: 508–519

## Anexo 1

### Calibración del muestreador de alto volumen con separador para PM2.5

Se instala un filtro limpio en el muestreador.

Se cierra el equipo.

Se instala el manómetro en el muestreador.

Se deja operar el equipo por cinco minutos.

Se toma la caída de presión en el manómetro.

Se toman los datos de presión atmosférica y temperatura locales.

Una vez tomada la lectura del manómetro se apaga el equipo y se retira el filtro.

Se instala el calibrador (VARIFLO) en el muestreador (Figura A1.1).



Figura A1.1 Instalación del VARIFLO.

Los orificios del VARIFLO deben encontrarse totalmente abiertos.

Se enciende nuevamente el quipo y se deja operar por al menos dos minutos.

Se comienza a girar la perilla del VARIFLO para ajustar la lectura de presión del manómetro al mismo valor que se obtuvo con el filtro limpio.

Una vez que se han igualado las presiones se toma la caída de presión del VARIFLO (Figura A 1)

Toda la información debe ser vaciada en la hoja de calibración del muestreador.



Figura A 1. 2.- Lectura de la caída de presión del VARIFLO



## Calculos

Primero debemos obtener el valor del flujo de diseño del equipo.

Este flujo corresponde al que se obtiene con el filtro limpio.

La presión del manómetro medida en el equipo en pulgadas de agua debe transformarse a Mg. Se multiplica por 1.87.

A la presión ambiente (Pa) se le resta la caída de presión del equipo  $DP_{cfd}$ .

La denominamos  $P1 = (Pa - DP_{cfd})$ .

Se obtiene la relación de presión ( $P1/Pa$ ), este cociente siempre va a ser menor de 1.

El valor obtenido de  $P1/Pa$  se cruza en la tabla de flujos "LOOK-UP TABLE" contra el valor de temperatura y donde se cruza es el flujo.

El segundo paso es obtener el valor de flujo dado por el calibrador VARIFLO.

La presión del manómetro medida en el equipo en pulgadas de agua debe transformarse a Mg. Se multiplica por 1.87.

Se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{STD} = \frac{\sqrt{\frac{\Delta H * Pa * T_{STD}}{P_{STD} * T_1}} - b}{m}$$

Este es el flujo volumétrico a condiciones estándar.

$m$  y  $b$  son la pendiente y la intersección al eje de la calibración del VARIFLO a condiciones estándar.

Una vez obtenido el flujo a condiciones estándar se transforma a las condiciones locales de presión y temperatura.

$$Q_a = Q_{STD} * \frac{P_{STD} * T_1}{P_a * T_{STD}}$$

El flujo obtenido con el VARIFLO debe ser el mismo (con un error no mayor del 5 %) que se obtuvo de la LOOK-UP TABLE con el filtro limpio instalado.

Si esto sucede la calibración se considera satisfactoria.

## Anexo 2

### Calculo de la concentración de PM2.5

Para obtener la concentración del filtro se hace lo siguiente.

Se obtiene el flujo de trabajo del equipo tal y como lo indica el formato de instalación del filtro.

Se obtiene el volumen de aire muestreado:  $V = Qa * t$ .

Donde:

V = Volumen de aire muestreado (m<sup>3</sup>)

Qa = Flujo volumetrico (m<sup>3</sup>/min)

t = Tiempo (min)

Ya obtenido el volumen de aire se procede al calculo de la concentración

$$C = \frac{(W_f - W_i) * 10^6}{V} \quad (\mu\text{g} / \text{m}^3)$$

Donde:

C = Concentración

Wi = Peso del filtro antes del muestreo (gramos)

Wf = Peso del filtro después del muestreo (gramos)

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Medicina. Departamento de Farmacología y Toxicología**

**MUESTREADOR DE PARTICULAS PM2.5 CON SISTEMA VENTURI**

Equipo: Muestreador de Alto Volumen  
 Marca: Tisch-Enviroment Estado: \_\_\_\_\_  
 Modelo: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_  
 No. de serie: \_\_\_\_\_ Localidad: \_\_\_\_\_

<b>FILTRO</b>	
No. de Filtro _____	
Fecha de instalación: _____	Fecha de retiro: _____

<b>DATOS DEL MUESTREO</b>	
ti: _____ Hrs	Convertir a minutos multiplicando por 60
tf: _____ Hrs	
Δt= tf - ti= _____ Hrs	Δt = _____ Mins
Pavg: _____ mm Hg	
Tavg: _____ °C	
Nota 1: ti y tf tomados del indicador de tiempo transcurrido del equipo	
Nota 2: La presión y temperatura son promedios del día del muestreo	

<b>FLUJO DE MUESTREO</b>	
ΔH <sub>2</sub> O <sub>i</sub> = _____ in H <sub>2</sub> O	Tomada cuando se instala el filtro en el equipo
ΔH <sub>2</sub> O <sub>f</sub> = _____ in H <sub>2</sub> O	Tomada antes de retirar el filtro del equipo después del muestreo
$\Delta H_2O_{avg} = (\Delta H_2O_f + \Delta H_2O_i) / 2 =$ _____ in H <sub>2</sub> O	
Para convertir a mmHg se multiplica X 1.87	$\Delta P = \Delta H_2O_{avg} * 1.87 =$ _____ mm Hg
$(P_{avg} - \Delta P) / P_{avg} =$ _____	
Para encontrar el valor del flujo cruzar el último resultado con la temperatura en la "Look-up Table"	
<b>Flujo de muestreo Qa =</b> _____	<b>m3/min</b>

Nota: A la gráfica del equipo se le deben anotar los datos del numero de filtro, sitio de muestreo, fecha, tiempos inicial y final

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Responsable: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

### CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS PM2.5

Numero de filtro = \_\_\_\_\_

	Inicial	Final
Peso (g)	_____	_____
Fecha	_____	_____
Operador	_____	_____

Calcular el volumen total del aire muestreado con la siguiente ecuación:

$$V = Q_a \times t = \underline{\hspace{2cm}}$$

Donde:

V = volumen de aire total

Q<sub>a</sub> = flujo de muestreo m<sup>3</sup>/min

t = tiempo total en minutos

Calcular y reportar la concentración de partículas con la siguiente ecuación:

$$PM_{2.5} = (P_f - P_i/V) (10^6)$$

Donde:

P<sub>f</sub> = peso final del filtro en gramos

P<sub>i</sub> = peso inicial del filtro en gramos

V = volumen de aire total

**Concentración de partículas PM2.5 =** \_\_\_\_\_ μg/m<sup>3</sup>

Responsable \_\_\_\_\_

Firma \_\_\_\_\_