

108
2ef.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

"INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS
METEOROLOGICOS EN LOS AEROSOLES
ATMOSFERICOS EN LA ZONA METROPOLITANA
DE LA CIUDAD DE MEXICO"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
MARIA DE LOS ANGELES MORALES PEREZ



MEXICO, D.F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE GONZALEZ ARREDONDO LETICIA MA. DE LOS ANGELES.
VOCAL GONZALEZ CHAVEZ JOSE LUZ
SECRETARIO MIRANDA MARTIN DEL CAMPO JAVIER
1er SUPLENTE TORRES BARRERA RODOLFO
2do SUPLENTE LUNA PABELLO VICTOR MANUEL

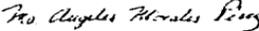
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

IFUNAM (Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México)

ASESOR:


Dr. Javier Miranda Martin del Campo

SUSTENTANTE:


Ma de los Angeles Morales Pérez

A mis Padres:

No existe en mi alma
amor más profundo y sincero
que el que siento por ustedes

Por su fe en Dios,
por su amor infinito,
por su entrega y sacrificio,
por su confianza y cariño incesante,

porque siempre encontré
cobijo entre sus brazos y
en mis malos momentos
siempre he sentido su amor,
compensan mis carencias
con débiles virtudes, fortalecen
mi alma y confortan mi dolor

No existe una forma justa de
corresponder tanto amor...

A Alejandro:

Más que un hermano, parte de mi ser,
mi amigo y consejero,
tu cariño noble y callado es
fuerza y compañía

infinitamente...

Gracias

A mi Familia.

A Ihali:

Por ser la hermana que pude escoger; gracias por tu cariño, pero sobre todo por tu amistad sincera.

A las Familias: Crespo Sosa y Jiménez Fernández.

A mis amigos y a todos los que hicieron de esta etapa la mejor de mi vida.

A todos los maestros que contribuyeron para mi formación profesional, en especial al Dr. Javier Miranda Martín del Campo, por ser un excelente maestro preocupado siempre por el bienestar de sus alumnos.

A G R A D E C I M I E N T O S

A mi asesor:

Dr. Javier Miranda Martín del Campo, gracias por sus consejos y apoyo, tan valiosos para la realización de este trabajo

A los profesores

Profr. Leticia Ma de los Angeles González Arredondo,

Profr. José Luz González Chávez,

Profr. Rodolfo Torres Barrera,

Profr. Victor Manuel Luna Pabello

Por su interés en mejorar este trabajo

A las personas que colaboraron en el desarrollo de la experimentación en el laboratorio del Acelerador de Van de Graaff 5.5 MeV.

Dr. Eduardo Andrade Ibarra,

Juan Carlos Pineda Santamaria,

Eustacio Pérez Zavala.

A Ernesto Santillana Orozco, Karim López Guzmán y Melitón Galindo González por su ayuda durante la colección de las muestras

Al Instituto de Física, U N A M., por las facilidades prestadas.

A D G A P A por el apoyo económico proporcionado

Al Q F B Raúl Garza Velasco, a la Profra. Elda Peniche y al H. Consejo Técnico de la Facultad de Química por su apoyo para la realización oportuna de este trabajo.

Al Dr. Martín Hernández Luna, por su apoyo y consejos.

A la U.N.A.M.
A México.

INDICE

INTRODUCCION	1
1. ANTECEDENTES	
1.1 Introducci3n	3
1.2 Atm3sfera	3
1.2.1 Trop3sfera	4
1.2.2 Estrat3sfera	5
1.2.3 Mes3sfera	5
1.2.4 Term3sfera	5
1.3 Composici3n de la atm3sfera	5
1.4 Clasificaci3n de contaminantes	7
1.4.1 Clasificaci3n por su origen	7
1.4.2 Clasificaci3n por su estado f3sico	7
1.5 Aerosoles	8
1.5.1 Propiedades	8
1.5.1.1 Tiempo de residencia	8
1.5.1.2 Tama3o de las part3culas	8
1.5.1.3 Sedimentaci3n	10
1.5.1.4 Coagulaci3n	10
1.5.1.5 Ciclo de los aerosoles	10
1.5.2 Clasificaci3n de los aerosoles	11
1.5.2.1 En funci3n de las fuentes que los emiten	11
1.5.2.2 Clasificaci3n con base en su distribuci3n	12
1.6 Meteorologia	12
1.6.1 Precipitaci3n y humedad	13
1.6.2 Estabilidad y inestabilidad	14
1.6.3 Efectos del viento	14
1.6.4 Mecanismo de nucleaci3n	15
1.7 Efectos de la contaminaci3n del aire	16
1.7.1 Efectos en la salud	16
1.7.1.1 El ojo humano	17
1.7.1.2 Sistema respiratorio	18
1.7.2 Efectos fisiol3gicos en el hombre	20
1.7.2.1 Contaminantes biol3gicos	20
1.7.2.2 Contaminantes no biol3gicos	20
1.7.3 Efectos sobre la visibilidad	25
1.7.4 Efectos sobre materiales y estructuras	26
1.7.4.1 Mecanismos de deterioro en atm3sferas contaminadas	26
1.7.5 Efectos sobre el clima	27
1.7.5.1 Efectos sobre el mecanismo de condensaci3n	27
1.7.5.2 Efectos sobre el mecanismo de nucleaci3n	28

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	
2.1 Introducción	29
2.2 Unidad de Filtros apilados SFU-500	31
2.3 Procedimiento de muestreo y metodología	33
2.4 Obtención de espectros mediante PIXE	36
2.5 Cálculo de las concentraciones elementales	38
3. RESULTADOS Y DISCUSION	47
4. CONCLUSIONES	78
APENDICE	
A. ESPECTROMETRIA PIXE	i
A.1 Fundamentos básicos de la espectrometría PIXE	i
A.2 Análisis cuantitativo con PIXE	v
A.3 Sistema experimental utilizado para la técnica PIXE	vi
A.4 Programa de cómputo Axil	vii
A.5 Superposición de líneas de emisión	vii
B. ACELERADORES VAN DE GRAAF	ix
B.1 Sistema de Vacío	x
B.2 Detectores de Radiación	x
B.3 Preamplificador	xi
B.4 Amplificador	xi
B.5 Analizador Multicanal	xii
BIBLIOGRAFIA	xiii

INTRODUCCION

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha tenido un crecimiento acelerado durante los últimos veinte años, que ha originado la acumulación de contaminantes, incrementando notablemente sus concentraciones. Si a lo anterior se le añade el poco interés de las autoridades por implantar medidas útiles al control de la contaminación del aire, resulta fácil entender que este problema haya adquirido grandes dimensiones. No es sino hasta los últimos años en que se ha desarrollado en México una red de monitoreo que tiene la función de medir gases contaminantes tales como el ozono, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre y monóxido de carbono; gracias a estas mediciones ha sido posible determinar la gravedad del problema de la contaminación día con día. Sin embargo a los aerosoles atmosféricos no se les ha dado la atención que requieren, dada su importancia fundamentada en la reducción de la visibilidad, daños a la salud de los seres vivos, contaminación del subsuelo al ser acarreados por precipitaciones pluviales y su contribución a la alteración de la temperatura global. La única medición que se hace respecto a ellos es la de partículas menores que $10 \mu\text{m}$ (PM10), a las que se mide los μg totales sobre m^3 sin determinar su composición.

De este modo la escasa información que se tiene de los aerosoles lleva a que ciertos sectores que podrían contribuir significativamente a reducir los niveles de contaminación, como lo es el sector industrial, ignoren la tendencia creciente que las concentraciones de partículas han tenido en los últimos 10 años.

El análisis de contenidos elementales en partículas suspendidas de tamaños respirables en la ZMCM se ha desarrollado fuera del país, no obstante que este tipo de análisis puede realizarse en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, ya que cuenta con el acelerador Van de Graaff de 5.5 MV. Con este equipo se utilizó la técnica de análisis Emisión de Rayos X Inducida por Protones (PIXE).

El presente trabajo proporciona un análisis de información relativa a las concentraciones elementales de aerosoles atmosféricos que fueron muestreados en un punto ubicado al suroeste de la ZMCM durante un periodo de un mes (14 de agosto al 14 de septiembre de 1995), buscando sus posibles relaciones con valores de parámetros meteorológicos registrados durante ese lapso de tiempo.

CAPITULO 1
ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCION

La contaminación atmosférica en la ZMCM se ha convertido en un problema que ha alertado tanto a la población como a autoridades y científicos, quienes en los últimos años han adquirido conciencia de la gravedad del problema. Los efectos de dicha contaminación son cada vez más notorios y a pesar de que se han tomado medidas para regularla no se han obtenido los resultados esperados, en gran medida debido a las condiciones geográficas que imperan en la zona. Localizada en la parte suroeste de una cuenca cerrada a $19^{\circ}35'$ de latitud norte y $99^{\circ}40'$ de longitud oeste, tiene una altitud de 2240 metros sobre el nivel del mar (Nava T. M. 1991). La ZMCM se encuentra rodeada por una cordillera de altas montañas que van del sur al oeste, del mismo modo montañas menores la delimitan a lo largo de la dirección norte-este, por esta razón el ambiente sobre la zona es completamente cerrado a excepción de las zonas sureste y noreste (Aldape F., et al. 1991). Por otro lado la concentración del 25% de la industria nacional en la ZMCM, la explosión demográfica que rebasa los 20 millones de habitantes y la gran cantidad de vehículos automotores (cerca de 3 millones) que consumen diversos tipos de combustibles (principalmente gasolina con plomo) han provocado que el problema de la contaminación atmosférica tome dimensiones alarmantes.

A continuación se discuten aspectos relacionados con lo que a contaminación atmosférica se refiere.

1.2 ATMOSFERA

La atmósfera terrestre no es sino una envoltente gaseosa de cerca de 2000 km de espesor. Una característica importante es el hecho de que su densidad disminuye con la altura hasta el extremo de que la mitad de su masa total le corresponde únicamente a los primeros cinco kilómetros. Para su estudio se le ha dividido en capas en función de la variación de la temperatura con la altura, así las propiedades de cada capa guardan

relación con la actividad química de sus contaminantes. De este modo la atmósfera se divide en:

- Tropósfera
- Estratósfera
- Mesósfera
- Termósfera

1.2.1 Tropósfera

Se considera la capa de mayor importancia porque contiene el aire que respiran los organismos vivos, además de ser en ella donde se desarrollan todos los procesos meteorológicos. Se caracteriza por una disminución regular de la temperatura con la altura con un valor de 0.6 °C por cada 100 m. Existe una zona en la que la temperatura es constante y se conoce como tropopausa. La tropósfera no es una capa continua, ya que presenta de dos a tres niveles de discontinuidad a latitudes diferentes en ambos hemisferios. La tropopausa tropical tiene un espesor de unos 16 km a 18 km. A una latitud de 35°-50° se presenta una discontinuidad de un espesor comprendido entre 9 km y 10 km entre esta capa y la tropopausa polar, en ambos hemisferios. Entre las tropopausas polar y tropical existe una tercera, la tropopausa de latitud media, con un espesor de 10 km a 12 km. La posición de las tropopausas varía, de altura y latitud, de un día a otro y con las estaciones.

A través de la tropopausa se produce un intercambio de materia relativamente lento y en ambas direcciones, el cambio que se da desde la tropósfera se produce en mayor parte en la tropopausa tropical, en tanto que el que se presenta en sentido inverso ocurre en la tropopausa de latitud media. El intercambio que la estratósfera efectúa con la tropósfera es un fenómeno importante que ocurre a lo largo de varios meses y que favorece la destrucción en esta última capa o en la superficie terrestre de los contaminantes vertidos en la estratósfera (escapes de aeronaves y residuos de explosiones nucleares atmosféricas). En cualquier hemisferio el tiempo de mezcla en la tropósfera es de semanas, mientras que el cambio completo entre ambos hemisferios tarda aproximadamente un año. Dado que la mayor parte de los contaminantes atmosféricos se vierte en el hemisferio norte, el lento tiempo de mezcla interatmosférica es importante para considerar las consecuencias globales de un contaminante atmosférico.

1.2.2 Estratósfera

Esta capa tiene propiedades físicas que se asemejan mucho con las de la tropósfera, sin embargo, el gradiente de temperatura se invierte de tal modo que a una distancia de 60 km se alcanzan cerca de 20 °C. Se cree que este aumento de temperatura está relacionado con la absorción por el ozono de radiación ultravioleta e infrarroja. Es en esta capa donde destaca el mezclado debido a que se presentan fuertes corrientes horizontales de aire y una mezcla vertical considerable. En esta capa no se desarrollan procesos relacionados con la precipitación, ya que su contenido de vapor de agua es muy bajo.

1.2.3 Mesósfera

En la mesósfera ocurre una disminución de la temperatura a medida que la altura aumenta de tal modo que en la mesopausa se alcanzan -70 °C. Dado que la concentración de ozono decrece rápidamente con la altura, puede pensarse que el descenso de temperatura en esta capa se deba a la disminución de la absorción de radiación solar por el ozono.

1.2.4 Termósfera

También se le llama ionosfera en virtud de la ionización del aire contenido en ella y que es ocasionada por la acción de la radiación solar; las partículas resultantes se disponen en una serie de subcapas, responsables de la reflexión de las ondas de radio. Esta capa es la más alta de la atmósfera y se caracteriza por un aumento regular de la temperatura con la altura alcanzando los 1000 °C en el límite superior (800 km aproximadamente). Este hecho está asociado con la absorción de radiación solar ultravioleta por el oxígeno y nitrógeno moleculares (*Spedding D. J. 1981*).

1.3 COMPOSICION DE LA ATMOSFERA

El aire es una mezcla bastante estable de gases cuyas proporciones relativas varían en las proximidades de la superficie terrestre sólo en unas pocas milésimas del 1%. A este respecto existen algunas excepciones, siendo la más importante la del vapor de agua, limitado casi exclusivamente a la tropósfera por los procesos de condensación y precipitación y donde puede alcanzar valores de hasta el 4% en volumen en algunos puntos o estar casi totalmente ausente en otros. La composición del aire seco es

Tabla 1 1

Composición del aire seco a nivel del mar (Speeding D. J. 1981)

COMPONENTE	PORCENTAJE EN VOLUMEN
Nitrógeno	78.084
Oxígeno	20.946
Argón	0.934
Dióxido de carbono	0.321
Neón	0.00182
Helio	0.00052
Criptón	0.00011
Xenón	0.0000087
Metano	0.000125

Cabe mencionar que en la atmósfera también se encuentran concentraciones variables de otros gases, tales como diversos hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrógeno, amoníaco, peróxido de hidrógeno, halógenos, radón, dióxido de azufre, ácido sulfhídrico, sulfuros orgánicos y mercaptanos.

La concentración de ozono varía notoriamente a través de la atmósfera y se halla principalmente en la estratosfera, debido a la combinación de reacciones de destrucción y producción fotoquímica junto con su gran reactividad frente a otros componentes atmosféricos.

Las proporciones relativas de los componentes mayoritarios permanecen casi invariables, al menos hasta los 80 km. A mayor altura, la producción de oxígeno y nitrógeno atómico es considerable, lo que cambia la composición porcentual de estos dos componentes (*Speeding D. J. 1981*).

Resulta importante hacer notar que todos los gases mencionados anteriormente pueden ser producidos por fuentes naturales más que por la actividad del hombre, por tanto, se consideran componentes de la atmósfera no contaminada.

Sin embargo, una vez que se consideran los contaminantes liberados por el hombre y la naturaleza, los porcentajes antes descritos son hipotéticos, ya que se

producen alteraciones en la composición atmosférica desencadenando lo que se conoce como contaminación atmosférica.

1.4 CLASIFICACION DE CONTAMINANTES

Los contaminantes del aire se pueden clasificar con base en su origen o a su estado físico

1.4.1 Clasificación por su origen

a) *Contaminantes primarios*. Son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera; un ejemplo de ellos son los óxidos de azufre (SO_x) liberados por el consumo de combustibles fósiles

b) *Contaminantes secundarios*. Cuando los contaminantes se forman como resultado de la reacción de material existente en la atmósfera con material emitido. La mayoría de los contaminantes secundarios son el resultado de reacciones fotoquímicas que emplean la energía de rayos solares. Sin embargo, existen reacciones que no son fotoquímicas y que producen contaminantes secundarios, un ejemplo de estas reacciones es la hidrólisis (SO_x se combina con el agua para formar H_2SO_4 , que es un contaminante muy corrosivo). Otro ejemplo es la oxidación catalítica donde los electrones de una molécula son removidos con ayuda de un catalizador (SO_x se oxida en la superficie de partículas suspendidas). Es posible que un material emitido a la atmósfera sea un contaminante primario y al sufrir una reacción química se convierta en uno secundario

1.4.2 Clasificación por su estado físico

a) *Contaminantes gaseosos*. Son gases orgánicos e inorgánicos que por su naturaleza tienden a permanecer suspendidos y no se depositan fácilmente

b) *Contaminantes particulados o aerosoles*. Son partículas de sólidos o líquidos finamente divididos mayores que una molécula (cerca de 0.2 nm de diámetro) pero menores de 500 μm y que se encuentran suspendidos en la atmósfera (Painter D. A. 1974).

Siendo los aerosoles el tema de estudio de este trabajo, resulta conveniente profundizar en su descripción.

1.5 AEROSOLES

Un aerosol se define como la suspensión de un líquido fino o de partículas sólidas en un gas. De este modo un aerosol atmosférico no es sino esta suspensión donde la atmósfera es el gas donde se encuentran suspendidas las partículas. Los aerosoles poseen un complicado carácter químico, además de propiedades físicas complejas y el interés en ellos radica en los posibles efectos que pueden ocasionar sobre el clima o bien sobre la salud de los seres vivos, en virtud de sus características tóxicas o mutagénicas. Sin embargo, existen limitaciones para poder predecir estos impactos, debido al escaso conocimiento de sus propiedades, así como al hecho de que son el resultado final de un amplio arreglo de procesos físicos y químicos y que, consecuentemente, sufrirán una gran cantidad de cambios en el tiempo y el espacio (Próspero J.M., et al. 1983).

1.5.1 Propiedades

1.5.1.1 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia de los aerosoles es una función del tamaño de la partícula y de su localización en la atmósfera. Para partículas del intervalo de $0.1 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$ de radio, el tiempo de residencia en la tropósfera es de aproximadamente una semana, en contraste, el correspondiente a las partículas que se encuentran en la estratósfera varía de meses a años. La variación del tiempo de residencia con la altitud es una consecuencia de diversos factores, principalmente la distribución del vapor de agua (que afecta a los procesos de remoción y conversión) y de la distribución vertical de un número de reactivos importantes que se producen fotoquímicamente (siendo el ozono y el radical OH^\bullet los más importantes).

1.5.1.2 Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas de un aerosol es vital para todos los aspectos de los aerosoles atmosféricos. Está regulado por procesos físicos, su límite superior depende de la fuerza de la gravedad y el inferior de los procesos de coagulación. En la tabla 1.2 se presentan los distintos nombres que se aplican a los aerosoles atmosféricos dependiendo del tamaño de las partículas. Gracias a los avances tecnológicos, entre ellos la microscopía electrónica, se ha observado que la forma de las partículas sólidas de la atmósfera varía considerablemente, desde las casi esféricas hasta las muy irregulares. El tamaño de las partículas se expresa usualmente en función del radio de

Stokes. El radio de Stokes se define como el de una esfera que tenga la misma velocidad de caída e igual densidad que la partícula

Tabla 1.2

Términos utilizados para describir el aerosol atmosférico (Speeding D. J. 1981)

Partículas Aitken	Radio menor a $0.1 \mu\text{m}$
Partículas grandes	Radio entre $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$
Partículas gigantes	Radio mayor a $1 \mu\text{m}$
Polvo	Procedentes de la fractura de material sólido y dispersas por corrientes de aire
Niebla	Proviene de condensación en fase vapor
Humo	Formado en un proceso de combustión

La distribución de los tamaños de los aerosoles tiene algunas características atribuibles a procesos de transformación que son de carácter físico y químico. Se sabe que la naturaleza de la distribución del tamaño de las partículas de los aerosoles atmosféricos es bimodal.

En la mayoría de las veces, las partículas menores de $1 \mu\text{m}$ de diámetro se forman por la conversión de gases a partículas, las mayores a $1 \mu\text{m}$ se forman directamente de procesos mecánicos (por ejemplo, el polvo levantado por el viento). El grupo de partículas finas se constituye por dos distintas poblaciones: las más pequeñas son los núcleos de Aitken que tienen relativamente un corto tiempo de residencia en la atmósfera debido a su reactividad química y a su movilidad física, el material de este grupo de aerosoles se incorporará eventualmente dentro de las partículas que van de $0.1 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$, a este grupo se le llama partículas de acumulación. No existen mecanismos eficientes mediante los que las partículas transitorias y de acumulación puedan convertirse en partículas gruesas, del mismo modo que las partículas gruesas no pueden transformarse en partículas finas. Mientras que partículas nuevas son continuamente creadas y modificadas, las existentes son constantemente removidas por

una amplia variedad de procesos secos y húmedos. La eficiencia de estos procesos depende del tamaño de la partícula. De este modo un aerosol específico está sujeto a un gran número de conversiones y remociones que son función del tamaño de partícula.

1.5.1.3 Sedimentación

Una partícula que cae en el aire encuentra una resistencia de fricción debido a la viscosidad del medio, por lo que para mantener uniforme su velocidad se ha de aplicar una fuerza constante que venza dicha resistencia. La magnitud de esta fuerza f viene dada por la ley de Stokes:

$$f = 6\pi r\eta u \quad (1.1)$$

donde r es el radio de la partícula pequeña, u su velocidad y η el coeficiente de viscosidad del aire. La sedimentación define el límite superior de tamaño de partículas de un aerosol atmosférico.

1.5.1.4 Coagulación

Se produce coagulación cuando las partículas se unen o fusionan por colisión, proceso continuo que lleva a que, en el transcurso del tiempo, disminuya el número de partículas, y aumente su tamaño.

1.5.1.5 Ciclo de los aerosoles

Es importante reconocer que los ciclos de los aerosoles están constituidos por una serie de procesos físicos unidos a uno o más ciclos químicos atmosféricos.

El ciclo más simple corresponde a partículas de material inerte y está constituido por tres etapas: el levantamiento, la transportación por el viento y su depósito. Esta clase de ciclo tiene importancia geoquímica, por ejemplo: es el mecanismo más grande de erosión de regiones áridas y es responsable de la formación de fracciones sustanciales de sedimentos oceánicos. Del mismo modo, la concentración de polvo mineral sobre una porción significativa del globo terrestre es suficientemente grande para producir severos daños que podrían tener efectos importantes en el balance de la radiación sobre grandes zonas del planeta.

En casos más complejos los aerosoles atmosféricos se someten a reacciones químicas que están relacionadas con la capacidad que estas partículas tienen para

absorber gases o catalizar reacciones gaseosas. Un ejemplo de este tipo de reacciones es la oxidación del SO_2 adsorbido¹

1.5.2 Clasificación de los Aerosoles

Los aerosoles se clasifican con base en las características de su fuente (reflejadas en la composición del aerosol) o bien de acuerdo a las características de distribución (donde la estructura atmosférica es el principal factor regulador) (*Próspero J. M., et al. 1983*).

1.5.2.1 En función de las fuentes que los emiten.

a) *Naturales*. Pueden ser

- Residuos de brisa marina
- Polvo mineral levantado por el viento
- Productos de origen volcánico (que incluyen la emisión directa de partículas y los productos derivados de las reacciones subsecuentes entre los gases emitidos)
- Materiales biogénicos. Son partículas emitidas y producidas a partir de la condensación de compuestos orgánicos volátiles producidos por plantas y árboles (por ejemplo los terpenos)
- Humo provocado por la combustión de materia orgánica
- Conversión natural de gas a partículas (por ejemplo los sulfatos derivados de la emisión de azufre reducido proveniente de la superficie oceánica)

b) *Antropogénicos*. Como su nombre lo indica son los contaminantes originados por el hombre y pueden ser

- Emisión de partículas antropogénicas como hollín, humo, polvo de caminos, etc.
- Productos de la conversión de gases antropogénicos

Cabe mencionar que los aerosoles antropogénicos dañan seriamente la salud de los seres vivos, en tanto que los aerosoles de origen natural ocasionan menos daño a

¹Resulta interesante poner de manifiesto que en el aerosol atmosférico se ha identificado SO_2 gaseoso, pese al hecho de que la mayor parte de los aerosoles urbanos contienen un 2-4% en peso de azufre, lo que sugiere que el SO_2 adsorbido se oxida rápidamente a sulfato sobre las partículas del aerosol. De este modo, es bien conocida la presencia de partículas ácidas en la atmósfera de zonas con alta concentración de SO_2 , acidez que se atribuye al H_2SO_4 formado por la oxidación del SO_2 . Cuando las partículas contienen metales alcalinos o alcalinotérreos, queda neutralizada la acidez, y se forman sulfatos (*Speeding D. J. 1981*)

pesar de que generalmente se producen en grandes cantidades (*Miranda J. en prensa (a)*).

1.5.2.2 Clasificación con base en su distribución

a) *Troposféricos*. En general estos aerosoles son una mezcla de partículas de origen marítimo y continental. La composición del aerosol marítimo es similar a la del océano, en tanto que el continental está compuesto de materiales procedentes de la superficie de la Tierra ya sea de origen natural o bien producidos por el hombre. Sobre las zonas centrales de los océanos predomina el aerosol marítimo y en el centro de las grandes zonas terrestres el aerosol continental.

b) *Estratosféricos*. Son el producto de erupciones volcánicas o partículas liberadas por los escapes de naves espaciales y de explosiones atómicas atmosféricas.

Es importante señalar que se tiene un mayor conocimiento de la composición, características y variabilidad espacial y temporal de los aerosoles estratosféricos que la que se tiene de los troposféricos. La razón radica principalmente en que las propiedades de los aerosoles localizados en la tropósfera varían mucho con el tiempo y el espacio debido a la gran diversidad y amplia distribución de fuentes que los emiten además de tener un tiempo de residencia corto.

1.6 METEOROLOGIA

La contaminación del aire es un problema derivado de la actividad del hombre y que amenaza con saturar a la atmósfera de desperdicios. Los contaminantes particulados tienden a coagularse, aumentar de tamaño y sedimentarse. De este modo, las partículas gruesas generalmente provocan problemas de contaminación regionales. Sin embargo, las partículas finas y los gases contaminantes están influidos por la acción de la difusión atmosférica y pueden ser arrastrados largas distancias desde su fuente de origen.

La Meteorología es la ciencia de la atmósfera y se encarga de estudiar todos los elementos que son característicos del clima. El clima de la tierra se produce a partir de la interacción de cuatro elementos primarios: el Sol, la Tierra, la atmósfera y formaciones naturales, así como factores geofísicos de la superficie de la Tierra.

1.6.1 Precipitación y humedad

Ambos factores afectan intensamente a la temperatura y al viento. El vapor de agua siempre está presente en la atmósfera y afecta directamente al balance entre la radiación liberada y recibida por la atmósfera. Parte de los rayos solares que llegan a la tierra son reflejados a la atmósfera y esta energía es en gran parte absorbida por el vapor de agua y CO_2 produciendo lo que se conoce como *efecto invernadero*, cuya función es proteger a la tierra de una exposición exagerada al calor durante el día y durante la noche previene el frío excesivo. Debido a que la temperatura de condensación de la atmósfera está por debajo de la temperatura de ebullición del agua, ésta es lo suficientemente volátil para evaporarse o sublimar a condiciones de presión y temperatura atmosféricas. Una forma de medir la cantidad de humedad presente en el aire es la temperatura del punto de rocío, es decir, aquélla a la que se alcanza la saturación si el aire es enfriado a presión atmosférica constante sin pérdidas ni ganancias de humedad.

En la superficie terrestre, durante la noche, el suelo libera energía absorbida a lo largo del día. Con esta disminución de la temperatura el vapor de agua existente en la atmósfera se condensa formando rocío o neblina, dependiendo del grado de enfriamiento. La formación de nubes, neblina o lluvia actúa directamente sobre la contaminación del aire (*Painter D. J. 1974*). En la atmósfera, la condensación del vapor de agua ocurre alrededor de partículas nucleantes cuando la humedad relativa alcanza un valor lo suficientemente alto para activar a los núcleos disponibles. Así, la condensación natural depende de la presencia de un número limitado de núcleos efectivos (también llamados núcleos de condensación de nubes, NCN) entre los que el agua existente deberá repartirse y que constituyen sólo una pequeña fracción del total de partículas suspendidas. Una vez que se lleva a cabo la condensación, las gotas pequeñas originadas se unen entre sí (coalescen) para formar gotas más grandes y de tamaño suficiente para poder precipitar.

De hecho, las partículas del aerosol atmosférico son una mezcla de materiales solubles e insolubles. La parte soluble es de gran importancia para la formación de pequeñas gotas en la atmósfera, de este modo, cuando la humedad relativa que rodea a una sal seca soluble rebasa la correspondiente a su disolución saturada, el agua se condensa sobre la partícula de sal, que entonces se transforma en una disolución saturada que contiene parte del material insoluble. Cuando aumenta la humedad relativa, crece el radio de la gotita y la disolución se hace menos saturada. Al aumentar el tamaño de la partícula, su posibilidad de depositarse por sedimentación aumenta.

De este modo puede inferirse que la probabilidad de precipitación a humedades relativas altas esta relacionada con la condensación de vapor de agua sobre el aerosol atmosférico. La mayor parte de la masa del aerosol atmosférico corresponde a las partículas grandes y gigantes, que son las más importantes en el proceso de condensación de vapor de agua. En consecuencia, gran parte de esta masa se separa por arrastre durante la lluvia.

1.6.2 Estabilidad e inestabilidad

Los cambios de presión y temperatura influyen en la estabilidad de la atmosfera. Con un incremento en la altitud, existe una disminución de la presión que permite que una porción de aire se expanda y enfrie. Si esta expansión ocurre sin pérdidas o ganancias de calor, se dice que el cambio es adiabático. Una porción de aire que descienda bajo estas condiciones encontrará mayores presiones, por lo que tenderá a contraerse y adquirirá mayor temperatura. La proporción con que la temperatura disminuye o aumenta con la altura se conoce como la *razón de curso del proceso adiabático seco* (RCPAS), que corresponde a 1 °C por cada 100 m.

La forma en que la temperatura cambia con la altura es función de la temperatura del aire y de la superficie sobre la cual se está moviendo, además de la relación de intercambio de calor entre ambos, estas variaciones determinan la estabilidad atmosférica. Si la temperatura disminuye más rápidamente con la altura que RCPAS, entonces el aire presenta una *razón de curso superadiabático* (RCS) y pierde su estabilidad. Del mismo modo, si la razón es menor que RCPAS se le denomina *razón de curso subadiabático*. Cuando la temperatura del fondo de una capa de aire es más fría que la temperatura de la parte superior, o bien, cuando la temperatura aumenta con la altura; se presenta lo que se conoce como *inversión*. Si no existe variación de temperatura con la altura en una capa de aire, se le denomina *isotérmica*.

1.6.3 Efectos del viento

Los factores meteorológicos influyen directamente en el ciclo de los aerosoles, principalmente sobre los mecanismos de transporte y difusión. Uno de los parámetros que ejerce más influencia es el viento.

Se define viento como el movimiento del aire en tres dimensiones. Su velocidad se mide en metros sobre segundo (m/s) y determina el tiempo durante el cual viaja un

contaminante desde su fuente hasta el receptor (que puede ser el hombre, plantas o animales) así como su dilución. La concentración de los contaminantes del aire es inversamente proporcional a la velocidad del viento; de este modo el viento que posee una velocidad alta dispersará rápidamente a los contaminantes. En relación a este último aspecto, es importante destacar que, a pesar de que frecuentemente el viento disminuye la concentración de los contaminantes del aire, este fenómeno se da únicamente para los contaminantes generados por el hombre; es decir, en el caso de tener una fuente local emisora de compuestos antropogénicos, la presencia de viento con una velocidad alta permitirá dispersar rápidamente a los contaminantes distribuyéndolos a lo largo de un área mayor. En el caso de los contaminantes de origen natural, principalmente el polvo, el efecto del viento es contrario al anteriormente descrito; la incidencia de vientos con altas velocidades ocasiona el levantamiento del polvo, llegando incluso a producir tolvaneras y dejando una gran cantidad de partículas de polvo suspendidas.

La dirección del viento es aquella en la que el viento sopla. Si la dirección del viento medida es representativa de su movimiento a la altura a la que es liberado un contaminante, entonces la dirección significativa del viento (que corresponde a la media de todas las mediciones) será un indicador de la dirección del viaje de los contaminantes (por ejemplo, un viento con dirección NW trasladará a los contaminantes hacia el SE de su fuente). La variabilidad del viento incluye desviaciones de la velocidad del viento que provocan turbulencia. La rugosidad de la superficie sobre la que fluye el aire (árboles, arbustos, construcciones, características del terreno) induce turbulencia mecánica, que será mayor cuando la velocidad del viento aumente. Existe otro tipo de turbulencia conocida como térmica y se produce por las variaciones de temperatura.

1.6.4 Mecanismo de nucleación

Cuando una nube de agua en estado líquido se subenfria, existen mecanismos que adquieren importancia en la formación de partículas de tamaño suficiente para precipitar. Si coexisten partículas de hielo con gotas de agua subenfriada, la presión de vapor alrededor de la gota es mayor a la que existe cerca de la partícula de hielo; de este modo, se genera un gradiente de presión entre ambas. El resultado de este gradiente es que las partículas de hielo crecen a expensas de las gotas de agua subenfriada. Las condiciones comunes de una nube establecen que la cantidad de partículas de hielo es considerablemente menor que la correspondiente a las gotas.

El proceso antes descrito tiende a formar partículas más grandes de tamaño, a pesar de reducir su cantidad. Como consecuencia, el crecimiento de tamaño de las partículas provoca la precipitación. Este mecanismo de precipitación se llama frecuentemente Proceso de Bergeron-Findeisen (*Wayne R. F. 1991*).

1.7 EFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE

Los efectos nocivos de las partículas suspendidas se manifiestan en la reducción de la visibilidad (fenómeno sumamente notorio en el Valle de México), en los daños que ocasionan a la salud de los seres vivos y en las pérdidas económicas de las áreas urbanas desencadenadas por el daño de construcciones de diversos materiales.

1.7.1 Efectos en la salud

La contaminación del aire relacionada con la salud es básicamente un problema ecológico. Es un problema no sólo para humanos sino para animales y plantas. La mayoría de los contaminantes del aire, al igual que otros materiales, aparecen después de cierto tiempo en el agua, en el suelo y consecuentemente en los animales.

La salud del hombre puede afectarse indirectamente con la ingestión de comida que ha estado en contacto con aire contaminado o bien, directamente por la aspiración de las partículas y gases a través del sistema respiratorio humano.

El aire comparado con otras necesidades de la vida, puede considerarse primordial, su importancia radica en su continua penetración a los pulmones, se ha estimado que un hombre puede vivir 5 semanas sin comida, 5 días sin agua y sólo 5 minutos sin aire (*Stern A. C. 1977*).

Existe evidencia que la contaminación del aire acompañada por estancamientos prolongados contribuye y agrava los padecimientos respiratorios tales como la bronquitis crónica, enfisema pulmonar, asma bronquial, cáncer pulmonar y edema pulmonar. La mayor susceptibilidad la presentan los infantes prematuros, los recién nacidos y personas débiles o bien que presenten enfermedades crónicas de los pulmones o del corazón. El asma bronquial se correlaciona altamente con las variaciones de sulfato en el aire, así como la combustión de basura. Al aumentar los niveles de

particulados combinados con SO_2 , o bien de SO_4 , los índices de mortandad debido a problemas cardio-respiratorios se incrementan visiblemente

El olor desagradable, la reducción de la visibilidad y el daño a la vegetación representan una guía para medir la gravedad de los efectos de la contaminación en la salud. Un ambiente gris sobre una ciudad o una zona industrial puede tener un efecto depresivo sobre los habitantes.

Así, los efectos de la contaminación atmosférica en la salud personal o de una comunidad pueden resumirse en

- a) Enfermedades agudas o la muerte,
- b) Enfermedades crónicas, reducción del tiempo de vida o deterioro en el crecimiento o desarrollo,
- c) Alteración de funciones fisiológicas importantes, tales como ventilación de los pulmones, transporte de oxígeno por la hemoglobina, o bien de funciones del sistema nervioso,
- d) Perturbación en el desarrollo de actividades, como lo son las atléticas, operación de vehículos automotores, aprendizaje, etc .
- e) Síntomas desfavorables como la irritación sensorial,
- f) Almacenamiento en el cuerpo de materiales potencialmente dañinos,
- g) Incomodidad, olores, reducción de la visibilidad u otros factores que puedan provocar que los individuos de cierta zona cambien de residencia o de lugar de trabajo

Como puede distinguirse de lo mencionado anteriormente, son la piel, el ojo humano y su sistema respiratorio las partes más afectadas por la contaminación del aire. A continuación se describen las características más importantes de los daños que pueden sufrir el ojo humano y el sistema respiratorio a causa de la contaminación.

1.7.1.1 El ojo humano

A pesar de que no ha sido posible atribuir a la contaminación atmosférica daños en este órgano, se han desarrollado estudios que muestran que el exceso de monóxido de carbono ocasiona una reducción en la agudeza visual. Por otra parte, puede presentarse irritación del ojo provocada por el contacto de gases o material particulado con el recubrimiento externo del ojo y con la mucosa interna de los párpados. Las sustancias que inducen esta irritación no están completamente identificadas, sin embargo, se sabe que algunos materiales particulados combinados con ozono, óxidos de

nitrógeno, hidrocarburos aromáticos y contaminantes sintéticos están relacionados con este daño

1.7.1.2 Sistema respiratorio

Sus funciones básicas son inhalar aire a los pulmones, filtrar impurezas del aire inhalado, proporcionar el oxígeno al sistema circulatorio y exhalar el CO₂ removido del sistema circulatorio. Para su estudio se le divide en dos zonas: el tracto respiratorio superior y el inferior.

Tracto respiratorio superior. Constituido por las cavidades nasales, faringe, laringe y tráquea; su función es remover la mayoría de las partículas suspendidas mayores a 10 µm de diámetro por inhalación y sucesiva exhalación del aire.

Los contaminantes gaseosos y las partículas no exhaladas son eliminadas al establecer contacto con el recubrimiento mucoso, esta capa mucosa, ayudada por los cilios capilares traslada a las partículas hacia la faringe, donde son expelidas por reflejos mecánicos (tos) que se originan en la laringe.

Tracto respiratorio inferior. Integrado por los bronquios, bronquiolos, ductos alveolares, sacos alveolares y alvéolos. En este tracto el aire fluye hacia los bronquios y posteriormente circula a través de ductos que disminuyen de tamaño pasando por los bronquiolos, ductos alveolares, sacos alveolares y finalmente llega a los alvéolos, que no son sino estructuras muy pequeñas rodeadas por finos capilares.

La respiración humana puede dividirse en ventilación y respiración. La ventilación es el proceso mecánico de inhalación del aire ambiental hacia los alvéolos de los pulmones y de exhalación del aire de desecho. La respiración es el intercambio de gases entre los alvéolos y la sangre, y se divide en respiración externa e interna.

La respiración externa es el intercambio de gases que se da entre la membrana respiratoria de los pulmones, localizada en los ductos alveolares, alvéolos y sacos alveolares, y la sangre contenida en los capilares pulmonares. Este intercambio de gases es acelerado por los movimientos de ventilación de los pulmones que aceleran la difusión de los gases por una regulación de presión.

Los gases se difunden rápidamente de un punto de alta presión hacia otro de menor presión. El dióxido de carbono se difunde de los capilares pulmonares (punto de alta presión) hacia los alveolos (sitio de menor presión); en tanto que el oxígeno se difunde en sentido contrario

La respiración interna es la difusión de gases entre la sangre contenida en el sistema de capilares y las células del cuerpo. Después de que el oxígeno se ha difundido hacia los capilares se combina con la hemoglobina de la sangre y es transportado por el sistema circulatorio como sólido formando óxido de hierro. Este óxido se convierte de nuevo en oxígeno gaseoso al difundirse de los capilares a la membrana de las células. Es en esta membrana donde se lleva a cabo el intercambio en el que el dióxido de carbono fluye hacia los capilares en tanto que el oxígeno es aceptado por la membrana celular. Cuando el dióxido de carbono se difunde de la célula a través de la membrana, se convierte en forma sólida. Este material es transportado por el sistema circulatorio hacia los pulmones, y al llegar a ellos adquiere de nuevo su forma gaseosa original. Así, el dióxido de carbono es eliminado por el cuerpo mediante la exhalación.

Las partículas menores que 10 μm de diámetro entran a las zonas más profundas de los pulmones; sin embargo, aquellas que son menores que 1 μm de diámetro se retienen más fácilmente. Existen varias formas en que estas partículas pueden ser removidas: mediante el recubrimiento de mucosa que se presenta desde los bronquiolos hasta el tracto superior respiratorio, por fluidos corporales que llevan a las partículas al linfa donde son filtrados, al entrar al efuente sanguíneo donde son arrastradas hasta los riñones que se encargan de excretarlas, o bien, reaccionando con los tejidos de los pulmones.

La membrana mucosa puede irritarse por las partículas, desencadenando dificultades respiratorias. Cuando las partículas reaccionan con los tejidos pulmonares, pueden originarse tres tipos de daño: bronquitis (congestión de los bronquiolos que reduce la entrega de gas), enfisema (destrucción de los alvéolos reduciendo el intercambio de oxígeno y de dióxido de carbono) y cáncer pulmonar (destrucción del tejido pulmonar). Dado que los sistemas respiratorio y circular están íntimamente ligados, cualquier disfunción en el sistema respiratorio afectará potencialmente al circulatorio. De este modo, son muy notables los problemas cardíacos durante periodos de contaminación atmosférica grave.

1.7.2 Efectos fisiológicos en el hombre

El daño que pueden ocasionar los contaminantes atmosféricos al funcionamiento de los órganos del cuerpo humano (efectos fisiológicos) es muy variado dependiendo de su naturaleza. Con base en este criterio, se ha decidido agruparlos según sus propiedades y efectos

1.7.2.1 Contaminantes biológicos

- a) **Aeroalérgenos.** Son materiales que transporta el aire y que provocan hipersensibilidad en individuos susceptibles.
- b) **Aerosoles biológicos.** Son suspensiones de microorganismos en el aire, tales como bacterias, hongos y virus que pueden causar enfermedades en hombres, animales, plantas o bien, la degradación en materiales inanimados. Proviene del suelo, plantas y agua. Dado que los microorganismos no viven en el aire, la transmisión de enfermedades se limita a zonas cerradas como los hospitales, hogares, oficinas y salones de clases, así como en espacios donde existe una gran cantidad de personas reunidas.

1.7.2.2 Contaminantes no biológicos

- a) **Aldehídos** Son el producto de la combustión incompleta de hidrocarburos y otros compuestos inorgánicos, los principales contaminantes de esta naturaleza son el formaldehído y la acroleína. Las principales fuentes emisoras son los escapes de los automóviles, la incineración de basura, reacciones fotoquímicas y consumo de combustibles. Provocan malos olores e irritación en el sistema respiratorio, ojos y piel.
- b) **Aluminio** Se utiliza en fuegos artificiales, pinturas, en la fabricación de utensilios de cocina, contenedores, equipo químico y conductores eléctricos. Es dañino cuando se inhala, ingiere o bien cuando es absorbido por la piel. Daña los tejidos de las membranas mucosas, tracto respiratorio superior, ojos y piel. Su inhalación puede ser fatal al provocar espasmos, inflamación y edema de la laringe y la tráquea; produce pulmonía y edema pulmonar.
- c) **Amoníaco** Liberado por la industria química, incineración de combustible y hornos de coque, produce efectos corrosivos en las membranas mucosas y dañan al ojo y al tracto respiratorio.
- d) **Arsénico** Este elemento y todos sus compuestos son tóxicos para el hombre, animales y plantas. El envenenamiento por partículas de arsénico suspendidas en la atmósfera es poco probable; sin embargo, cuando no existen dispositivos de regulación en las fundidoras de este metal, es posible que suceda. Los herbicidas que contienen

arsénico se utilizan para eliminar plantas acuáticas ya que los animales de este ecosistema presentan una tolerancia alta, pero su uso debe controlarse adecuadamente para evitar la contaminación del aire. En la industria del algodón se utiliza como un agente de secado que elimina las hojas del algodón antes de colectarse; cuando se incineran los residuos de la colecta, el arsénico utilizado se libera hacia la atmósfera. En el hombre al ser inhalado, ingerido o bien, absorbido a través de la piel, ocasiona dermatitis, bronquitis e irritación nasal, posiblemente carcinógeno.

- e) **Asbesto** Es el nombre que se les da a una variedad de fibras minerales. La inhalación de asbesto en polvo es un peligro latente para las personas que viven cerca de una fábrica de estos compuestos, ya que ocasiona fibrosis pulmonar, calcificación pleural y cáncer pulmonar.
- f) **Azufre**. Ver óxidos de azufre.
- g) **Bario** Es un elemento metálico y suave que se encuentra en la naturaleza combinado con otros elementos. La contaminación por este elemento es producida por la industria de extracción, refinaria y producción del mismo, así como de sus compuestos. Sus compuestos insolubles, como el sulfato, son generalmente no tóxicos, sin embargo, aquellos que si son solubles constituyen un peligro muy grande cuando son ingeridos ya que producen un efecto fuertemente estimulante a los músculos del cuerpo, principalmente al corazón. También afecta a los tractos respiratorio y gastrointestinal, además del sistema nervioso central.
- h) **Berilio** Junto con sus compuestos, este elemento es de gran interés por sus efectos altamente dañinos a la salud de los seres humanos. Se le considera entre los elementos más tóxicos y peligrosos existentes. Se libera a la atmósfera por ser un elemento útil en la fabricación de lámparas fluorescentes y combustibles para motores. El manejo de sales solubles de berilio provoca serios daños en los pulmones, piel y membranas mucosas.
- i) **Boro** Es emitido por la industria que lo produce, está presente en el carbón y en aditivos para combustibles. Sus compuestos se consideran altamente tóxicos cuando se ingieren o inhalan. Como polvo ocasiona irritación e inflamación; sus hidruros provocan daños al sistema nervioso central y pueden llegar a causar la muerte.
- j) **Cadmio** La naturaleza de la acción biológica de este elemento no es completamente conocida, sin embargo se le considera, al igual que a sus compuestos, tóxico para el hombre. Las industrias del metal, relacionadas con la extracción, refinaria, electroplateado y soldado de materiales de cadmio son las principales fuentes emisoras. Es un subproducto del refinado de plomo, zinc y cobre, también se utiliza en la producción del tetraetil de plomo, pesticidas, fertilizantes y baterías de níquel.

cadmio. Provoca envenenamiento agudo y crónico, por inhalación de vapores ocasiona daño a los riñones, enfisema, bronquitis, cáncer, problemas gástricos e intestinales, enfermedades del corazón y cerebro.

- k) Calcio.** Se emplea en la industria de fertilizantes, alimenticia y de fármacos. Se utiliza como agente limpiador de aleaciones no ferrosas en combinación de oxígeno y azufre. El óxido de calcio se hidroliza formando hidróxido de calcio, esta reacción tiene efectos dañinos al tejido ocular dada la naturaleza alcalina del compuesto formado. Es malo si se ingiere o se inhala. Destruye los tejidos de las membranas mucosas, tracto respiratorio superior, ojos y piel; su inhalación puede resultar fatal provocando espasmos, inflamación y edema de la laringe y bronquios; puede provocar pulmonía y edema pulmonar.
- l) Cloro.** Es un gas denso, amarillo verdoso con un olor irritante. Es un agente muy reactivo capaz de reaccionar con materia orgánica e inorgánica. Es esta propiedad la que lo convierte en una sustancia sumamente peligrosa para todos los seres vivos. En presencia de humedad reacciona para formar ácido clorhídrico. La única forma de emitirlo es por fugas durante su almacenaje o bien, por procesos industriales que lo empleen. Ocasiona irritación a los ojos, nariz y garganta. En grandes dosis produce daños a los pulmones como edema, neumonitis, enfisema y bronquitis.
- m) Cobre.** Es un subproducto en la extracción de la plata, se utiliza en la producción de bronce y latón, de recubrimientos, tubería y artículos moldeados. Los vapores de este elemento causan irritación en el tracto respiratorio superior así como sabor dulce metálico, el polvo y brisas de sales de cobre provocan irritación en el tracto respiratorio superior al ser inhalados y comezón al contacto con la piel, en concentraciones elevadas producen irritación, ulceración y perforación de las fosas nasales.
- n) Cromo.** En forma metálica se considera no tóxico; no obstante, los compuestos de cromo trivalentes y hexavalentes son tóxicos y se encuentran fácilmente en el aire. El trióxido de cromo (CrO_3) es tal vez el compuesto más importante, ya que al reaccionar con el agua produce ácido crómico (H_2CrO_4), que es muy corrosivo. Es emitido por industrias químicas y metalúrgicas, y está presente en compuestos cromados, cemento y asbesto. Daña a los tejidos del cuerpo, es irritante y corrosivo; se cree que es carcinógeno y produce dermatitis y úlceras en la piel, además de perforar los conductos nasales.
- ñ) Etileno.** Es un hidrocarburo gaseoso, incoloro que a pesar de no ser tóxico para el hombre representa un grave problema de contaminación atmosférica. Este compuesto contribuye a la contaminación fotoquímica del aire, cuando se combina con los óxidos

de nitrógeno y con el ozono provoca irritación en los ojos. Lo emiten los vehículos automotores, industrias químicas y por la incineración de residuos de la agricultura.

- o) **Hierro.** Es emitido por plantas productoras de acero y está contenido en las cenizas desprendidas por la combustión de carbón, combustóleo y basura. Sus óxidos actúan como vehículo de transporte de carcinógenos y del dióxido de azufre, llevándolos al interior de los pulmones
- p) **Fósforo.** Es emitido a la atmósfera por vehículos y aviones que lo emplean como un inhibidor de corrosión al agregarlo al combustible y por plantas productoras de fertilizantes, ácido fosfórico y pentóxido de fósforo, otra fuente son las incineradoras de cadáveres. Produce irritación a la piel o a altas concentraciones afecta al sistema nervioso
- q) **Manganeso.** Al inhalarse, ingerirse o incluso al ser absorbido a través de la piel, produce envenenamiento crónico, que no es sino una enfermedad del sistema nervioso central; también causa neumonía manganésica (enfermedad con alta mortandad). Tiene la propiedad de actuar como catalizador en la oxidación de otros contaminantes produciendo sustancias indeseables. Como contaminante se genera durante la incineración de productos que lo contengan o bien en procesos de producción de compuestos de ferromanganeso
- r) **Mercurio.** Es un metal líquido que a temperaturas normales emite vapores hacia la atmósfera, provocando contaminación del aire. La inhalación de sus vapores ocasiona intoxicación o envenenamiento de mayor gravedad que si el mercurio fuera ingerido. En la actualidad existen pesticidas que lo contienen constituyendo una fuente emisora significativa, otra fuente es la industria de la extracción y refinación de mercurio
- rr) **Níquel y sus compuestos.** La contaminación de este tipo es generada por plantas metalúrgicas, motores que emplean combustibles con aditivos o bien la incineración de productos que contengan níquel. En forma de polvo o bien, sus vapores, puede ser inhalado o absorbido por la piel provocando cáncer pulmonar, disfunciones respiratorias y dermatitis
- s) **Oxidos de Nitrógeno.** Son los precursores de la formación de ozono, cuando la molécula de óxido nítrico (NO_2) se rompe por la acción de la luz ultravioleta se forma NO y O , siendo este oxígeno el átomo que se combina con el oxígeno molecular (O_2) para producir una molécula de ozono (O_3).
- t) **Ozono.** Constituye el 99% de los oxidantes producidos por reacciones fotoquímicas. Las concentraciones que exceden a $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provocan irritación a los ojos
- u) **Plomo.** Es un veneno muy conocido. Los compuestos alquilados de este elemento, que en un principio se usaron como aditivos para la gasolina, son fácilmente

absorbidos por la piel y las membranas mucosas y se distribuye en la fase liposoluble del cuerpo, incluyendo en el cerebro. Cerca del 50% del plomo inhalado es retenido, y cuando la cantidad de éste alcanza un nivel muy alto, interfiere en el desarrollo de los glóbulos rojos de la sangre así como en la producción de hemoglobina. Se encuentra en las emisiones de los automóviles que emplean gasolina con plomo, se libera gran cantidad de él en las fundidoras de plomo, en la combustión de carbón, combustóleo y durante el consumo de pesticidas.

- v) Selenio. Como contaminante, se genera durante el uso de combustibles industriales y durante la incineración de desperdicios (incluyendo aquéllos que contengan papel); también forma parte de las emisiones gaseosas de las refinerías. En algunos países constituye un problema serio de envenenamiento al ingerir alimentos que están en contacto con aire contaminado. Produce irritación a los ojos, nariz, tracto respiratorio y gastrointestinal; la exposición crónica está relacionada con enfermedades del corazón y cáncer.
- w) Vanadio. Se libera por industrias de refinería y de aleaciones, por plantas generadoras de potencia y por el uso de aceites ricos en este compuesto. Tiene efectos fisiológicos de severidad variable en los tractos respiratorio y gastrointestinal; es un inhibidor de la síntesis del colesterol.
- x) Zinc. La contaminación por este compuesto se da por refinerías, producción de abrasivos y por procesos de galvanizado. Es tóxico únicamente en altas concentraciones, sin embargo, su inhalación produce irritación en las membranas mucosas.
- y) Contaminantes que producen olor. En adición a los efectos señalados en los contaminantes antes descritos, la combinación de varias sustancias orgánicas e inorgánicas producen contaminantes que generan olores que pueden ser agradables o indeseables. Los malos olores son una de las primeras manifestaciones de contaminación atmosférica y frecuentemente desencadenan reacciones emocionales, que producen efectos fisiológicos y mentales tales como náuseas, dolor de cabeza, pérdida de sueño y de apetito, respiración anormal e incluso reacciones alérgicas. Los compuestos más representativos de este grupo son el sulfhídrico, aldehídos, cloro, ácido clorhídrico, amoníaco y etileno.
- z) Carcinógenos orgánicos. Se distinguen tres categorías: hidrocarburos aromáticos polinucleares, compuestos heterocíclicos polinucleares y compuestos oxigenados, y por último agentes alquilantes. Existe una asociación aparente entre el cáncer pulmonar y estos compuestos. Las principales fuentes de emisión son los incineradores

de basura, los escapes de los automóviles, procesos industriales y la generación de energía calorífica.

aa)Pesticidas químicos. Los pesticidas químicos son empleados para controlar y destruir plagas que ocasionan pérdidas económicas o daños a la salud. Se pueden agrupar de acuerdo al uso específico en insecticidas, fungicidas, raticidas, repelentes, atrayentes, reguladores del crecimiento de las plantas, etc. Son utilizados en el hogar, agricultura, cuidado forestal, almacenamiento de alimentos y saneamiento urbano principalmente. A pesar de que pretenden ser tóxicos únicamente para ciertas formas de vida, el uso inadecuado de ellos puede provocar efectos adversos en la salud humana. Pueden introducirse al cuerpo por ingestión, inhalación y absorción a través de la piel. Los insecticidas de hidrocarburos clorados y de compuestos organofosforosos representan el principal riesgo a la salud debido a su toxicidad. Los síntomas de envenenamiento se caracterizan por dolores de cabeza, alteraciones estomacales, irritabilidad y desvanecimientos.

bb)Oxidos de azufre (SO_x). Producidos principalmente por el consumo de carbón y otros combustibles. Forman ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido sulfuroso (H_2SO_3), al combinarse con otros elementos forman sales que constituyen un problema de contaminación considerable; interactúan con las partículas suspendidas afectando a la salud. Causan irritación intensa, enfermedades respiratorias y padecimientos cardiacos.

1.7.3 Efectos sobre la visibilidad

Se define visibilidad a la claridad con que los objetos pueden distinguirse de sus alrededores. Por tanto, este parámetro lo determina un observador que al mirar su entorno es capaz de identificar luces y objetos. Con la finalidad de establecer un término más simple se ha definido alcance visual, que especifica la distancia a la que un objeto puede verse claramente.

Las partículas suspendidas en la atmósfera reducen el alcance visual al afectar la radiación solar global o de onda corta G que se recibe en la superficie de la Tierra. Esta radiación consiste de una componente directa D , y de una componente difusa d .

$$G = D + d \quad (1.2)$$

Para la latitud de la atmósfera de la ZMCM que se encuentre limpia, sin nubes y seca, d tiene un valor entre el 10% y el 15% del valor de G . En la época de lluvias, las nubes aumentan la dispersión de la radiación directa, incrementando la radiación difusa.

hasta el 25% de la total. En consecuencia el valor de D oscila entre el 75% y el 90% del valor de G . Sin embargo el crecimiento de d no es lineal con las disminuciones de la componente directa D (Galindo I. 1990).

La radiación solar directa D es tal vez el elemento del sistema climático más sensible a cambios de la composición atmosférica producidos por las actividades humanas. El incremento de aerosoles y de gases, provoca una disminución por extinción, es decir, por absorción y dispersión, del haz de radiación directa; incrementándose de este modo la radiación difusa

Los aerosoles que más contribuyen a la reducción de la visibilidad son los de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfatos. Las gotas suspendidas de ácido sulfúrico así como los sulfatos formados a partir de la acción catalítica de los óxidos de azufre, dispersan la luz. Esto se debe a que una importante fracción del sulfato presente en el aire urbano tiene un tamaño efectivo de menos de $2 \mu m$, siendo su pico de distribución de tamaño entre $0.2 \mu m$ y $0.9 \mu m$. Así, estas partículas están dentro del intervalo visible del espectro electromagnético, que como se sabe corresponde a una longitud de onda de $0.4 \mu m$ a $0.8 \mu m$

1.7.4 Efectos sobre materiales y estructuras

La contaminación del aire ha ocasionado pérdidas económicas considerables para las áreas urbanas, debido principalmente a los daños que ocasionan los contaminantes a materiales; estos daños pueden ser tales como la corrosión de metales, fracturas de plásticos, erosión y ensuciamiento de superficies de construcciones, deterioro de obras de arte y materiales teñidos, entre otros.

1.7.4.1 Mecanismos de deterioro en atmósferas contaminadas

- a) Abrasión. Las partículas sólidas de tamaño significativo pueden provocar un daño destructivo por este mecanismo al viajar a velocidades altas.
- b) Depósito y remoción. La apariencia de superficies expuestas al aire contaminado se afecta cuando el material particulado (sólido y líquido) se deposita en ellas; la remoción de las partículas representa una pérdida económica e implica un efecto destructivo de la superficie, que es notorio sólo a largo plazo.
- c) Ataque químico directo. Algunos contaminantes reaccionan directamente con los materiales en los que se depositan, provocando su deterioro.

- d) Ataque químico indirecto. Ocurre cuando algunos contaminantes que fueron absorbidos por la superficie reaccionan con otros compuestos ajenos a ella ocasionándole un daño.
- e) Corrosión electroquímica. La mayoría de los daños que sufren los metales ferrosos se debe a este mecanismo. Al estar expuestas las superficies metálicas a la atmósfera se forman pequeñas celdas electroquímicas en las que la distancia existente entre ánodo y cátodo es pequeña; la diferencia de potencial entre éstos es la fuerza que induce la acción corrosiva. Sin embargo, es indispensable que la superficie se encuentre húmeda para que se lleve a cabo este mecanismo, la existencia de contaminantes aumenta la conductividad eléctrica acelerando la corrosión.

1.7.5 Efectos sobre el clima

La contaminación del aire altera los procesos naturales de formación de lluvia y nubes, ocasionando cambios en la energía radiante que se recibe en la superficie de la Tierra, así como variaciones en las propiedades eléctricas de la atmósfera.

1.7.5.1 Efectos sobre el mecanismo de condensación

El efecto de las partículas suspendidas en la precipitación es bastante complejo. Aparentemente cuando una nube no contiene un número significativo de partículas gigantes (mayores a $1 \mu\text{m}$ de diámetro), la adición de grandes cantidades de pequeños núcleos al sistema reducirá la probabilidad de que la precipitación ocurra, debido a que el proceso de coalescencia es menos efectivo cuando la distribución de tamaño de las gotas que forman a la nube se reduce y el número de núcleos aumenta. A pesar de esto, si el sistema inicial contuviera una cantidad considerable de partículas gigantes de tal modo que el proceso de coalescencia pudiera iniciarse, el efecto de la introducción de NCN de tamaño pequeño sería importante. Los impactos observados en la formación de nubes, están en función de que la introducción de los contaminantes no altera la masa de aire en ningún otro aspecto más que en el hecho de considerarse como núcleos de condensación. Las fuentes emisoras de partículas contaminantes proporcionan calor y vapor de agua al aire, aspectos importantes al inicio del proceso de condensación; por otro lado estas fuentes se localizan en zonas donde las condiciones de la masa de aire pueda presentar movimientos verticales y turbulencia. Considerando lo anterior, a pesar de que la presencia de contaminantes altera la concentración de NCN en la atmósfera, los efectos de esta influencia no siempre son predecibles.

1.7.5.2 Efectos sobre el mecanismo de nucleación

La eficiencia de este mecanismo para producir lluvia depende de la presencia de suficientes núcleos de hielo para proveer al sistema de las necesarias partículas precipitables. La atmósfera, generalmente, mantiene una deficiencia en la disponibilidad de este tipo de núcleos. En relación a este aspecto, se ha encontrado que los vapores de yoduro de plata (AgI) y el hielo seco aumentan considerablemente la cantidad disponible de núcleos de hielo en una nube, por lo que su adición en el momento y lugar indicado aumenta la precipitación, o bien, bajo otras condiciones, disipa a las nubes y a la neblina. Existe evidencia de que algunos contaminantes pueden actuar como núcleos de hielo. En función de la veracidad de este pronunciamiento, puede concluirse que la contaminación altera el proceso de precipitación.

CAPITULO 2
DESARROLLO
EXPERIMENTAL

2.1 INTRODUCCION

El procedimiento seguido consistió en la colección de muestras de aerosoles atmosféricos durante un mes comprendido entre el 14 de agosto y el 14 de septiembre de 1995. El sitio de muestreo se estableció en las instalaciones del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el campus de Ciudad Universitaria; esta institución se localiza al suroeste de la ZMCM dentro de una zona residencial donde las actividades industriales y el tránsito vehicular son menos importantes que en otras áreas.

El muestreo de aerosoles se realizó dividiendo los días en tres periodos, siendo los dos primeros de seis horas cada uno, de 9:00 horas a 15:00 horas (mañana) y de 15:00 horas a 21:00 horas (tarde); el tercer periodo (noche) comprendió doce horas de muestreo y comenzó a las 21:00 horas, terminando a las 9:00 horas del día siguiente. De este modo la colección se iniciaba los lunes a las 9:00 horas y continuaba a lo largo de toda la semana, hasta finalizar los viernes a las 21:00 horas. Al finalizar el periodo de muestreo se obtuvieron un total de 64 muestras, que posteriormente se sometieron a la técnica PIXE (Emisión de rayos X inducida por Protones) con la finalidad de obtener los espectros de las muestras, que al analizarse mediante el programa AXIL y después de un manejo de los resultados, proporcionaron las concentraciones elementales presentes en cada filtro.

En relación con los parámetros meteorológicos, la información fue proporcionada por la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) y corresponde a datos de velocidad y dirección del viento ($V.V.$ y $D.V.$, respectivamente), así como de humedad relativa (H.R.); estas mediciones son lecturas realizadas cada hora a lo largo de todo el día. Una vez obtenidas las concentraciones elementales de cada muestra, se desarrollaron matrices de correlación y dendogramas para cada periodo del día, relacionando los parámetros meteorológicos con estas concentraciones.

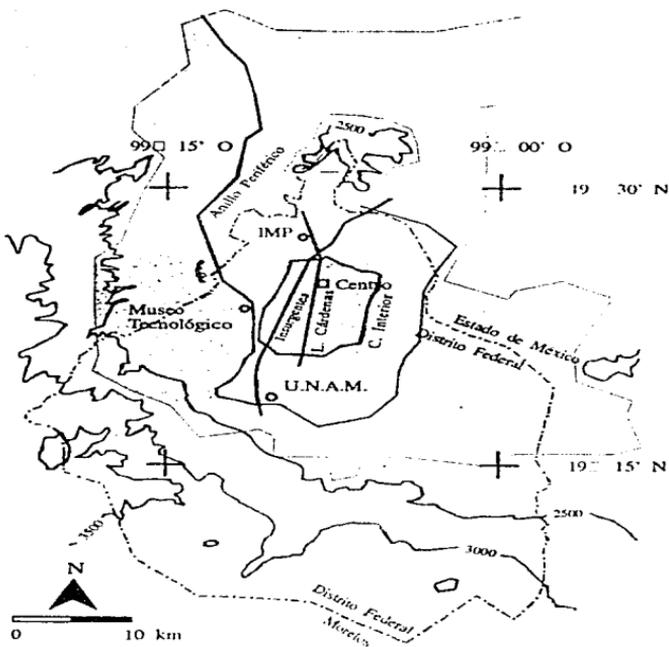


Figura 2.1
 Ubicación geográfica del sitio de muestreo, U.N.A.M.

2.2 UNIDAD DE FILTROS APILADOS SFU-500

Para la colección de aerosoles se utilizó la Unidad de Filtros Apilados serie 500 (SFU-500), sistema diseñado por la Universidad de Davis, California. Este equipo consta de las siguientes partes:

- Muestreador
- Rejilla para coleccionar partículas mayores a 15 μm
- Bomba
- Ventiladores para el enfriamiento de la bomba
- Rotámetro con una escala en L/min
- Reloj
- Programador de funcionamiento
- Interruptor de encendido
- Manguera para conexión

Es en el muestreador donde se coleccionan los aerosoles, el cuál está constituido por un portafiltros que posee dos secciones distintas, en las que se colocan los filtros (ver fig. 2.2).

Los aerosoles atmosféricos presentan una distribución bimodal de tamaños, en la que se pueden agrupar todas las partículas menores de 2.5 μm dentro de una fracción fina, y aquellas de un tamaño comprendido entre 2.5 μm y 15 μm dentro de la fracción gruesa.

Generalmente la fracción gruesa está constituida por aerosoles de origen natural, en tanto que la fina corresponde a aerosoles antropogénicos. La Unidad de Filtros Apilados SFU-500 permite obtener esta distribución de tamaños.

La primera sección del muestreador lleva en su interior un filtro de un polímero hidrofílico, Nuclepore (marca registrada por *Costar Corporation, U.S.A.*) con poros de un diámetro de 8 μm , es aquí donde se captura la fracción gruesa; por otro lado, la fracción fina de los aerosoles es coleccionada en la segunda sección de la unidad; para este fin se utilizaron filtros de Nuclepore con un diámetro de poro de 0.4 μm .

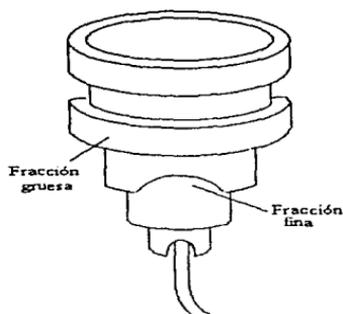


Figura 2.2
Esquema del muestreador

El muestreador se instaló a una distancia aproximada de dos metros del suelo; se seleccionó una zona de fácil acceso y alejada de fuentes locales de contaminación (por ejemplo chimeneas, caminos, etc.). El muestreador se conecta mediante una manguera flexible a una bomba cuya función es succionar el aire que pasa a través de los filtros. La bomba puede programarse para establecer los periodos de funcionamiento, tiene un interruptor e indicador de encendido, cuenta con un reloj y un rotámetro que mide el flujo en L/min; el flujo puede ser regulado mediante un tornillo de ajuste (*Air Quality Group, Davis University, California, 1987*).

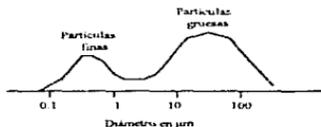


Figura 2.3
Distribución típica de aerosoles atmosféricos

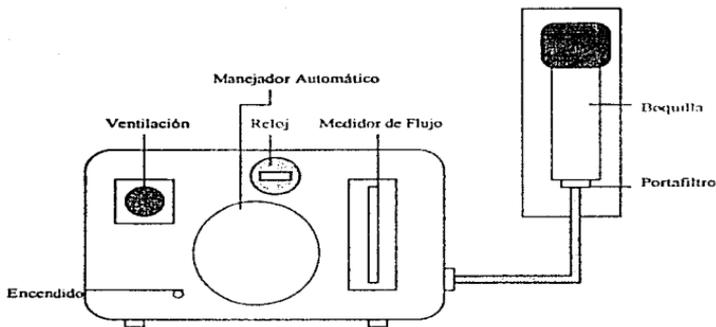


Figura 2.4
 Representación esquemática de la unidad de monitoreo

2.3 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO Y METODOLOGIA

A lo largo de todo el muestreo se utilizó una bitácora en la que se acumuló toda la información concerniente a los filtros. Cada juego de filtros (fracción fina y gruesa) correspondientes al mismo periodo del día, y por tanto al mismo muestreador, se identificó con un número. Los filtros de poros de diámetro de $0.4 \mu\text{m}$ tenían asignada la clave 4NUC seguida de dos dígitos correspondientes a la numeración asignada; este mismo procedimiento se empleó para los filtros colectores de la fracción gruesa, la clave empleada en este caso fue 8NUC; del mismo modo a cada muestreador se le asignó una clave para facilitar su manejo y evitar confusiones.

Los filtros empleados se pesaron en una balanza analítica OHAUS GA200D para determinar su masa gravimétrica antes de ser usados. Una vez registrado este dato, se expusieron a una fuente radioactiva de ^{241}Am con la finalidad de eliminar la carga estática que acumulan y así facilitar su manejo; el tiempo de exposición a esta fuente fue aproximadamente de 3 minutos. Es importante señalar que durante el manejo de los filtros se evitó cualquier contacto de materiales externos con ellos para prevenir el riesgo de una contaminación que pudiera alterar los resultados de los análisis.

Después de transcurrido el tiempo de exposición a la fuente, se cargaron los filtros en el muestreador. A cada muestreador le acompañaba una hoja de registro en la que se recopilaba la información correspondiente al periodo de muestreo.

De este modo, al iniciar un periodo era necesario tomar lecturas del tiempo indicado por el reloj de la bomba, posteriormente se encendía la bomba y se ajustaba el flujo con la finalidad de que el rotámetro indicara 10 L/min. A lo largo de la exposición de los filtros se observaron las condiciones climáticas; así como cualquier aspecto que pudiera alterar el funcionamiento normal del equipo. Una vez finalizado el muestreo, se registraron lecturas de tiempo y flujo, la bomba se apagó durante el cambio de un muestreador por otro y se tuvo el cuidado de tapar siempre la unidad que se retiraba para evitar cualquier alteración de las partículas colectadas.

Los filtros expuestos se retiraron de la unidad y se pesaron nuevamente con la finalidad de poder determinar el valor de la masa gravimétrica correspondiente al depósito de las partículas colectadas; posteriormente cada filtro se guardó en una caja de Petri a la que se le identificó con la clave del filtro.



INSTITUTO DE FISICA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
DEPARTAMENTO DE FISICA EXPERIMENTAL
Apartado Postal 20-364
México, D.F. 01000
TEL (5) 622-5005; 622-5029
FAX: (5) 622-5009

HOJA DE REGISTRO
RED DE MONITOREO DE AEROSOLES FINOS

Localización

Sitio: _____ Nombre de Sitio: _____
Filtro: _____ Fecha de carga en IFUNAM: _____

Fecha y Hora de Cambios de Portafiltro

Desde: Día: _____ Hora: _____ Hasta: Día: _____ Hora: _____

Lectura del Medidor

Inicio: _____ min (La última cifra en el medidor son décimas de minuto)
Final: _____ min

Tiempo Transcurrido: _____ min

Flujo

Flujo inicial: _____ litros/min
Flujo final: _____ litros/min

(El flujo inicial deben ser 10 litros/min, marcados por la parte superior de la esferita)

Condiciones del día en que se toma la muestra

Condición de la caja de la unidad
 Seca Húmeda Hielo Nieve
Condición del tiempo
 Normal Lluvia Polvo Neblina Nieve
Cielo
 Despejado Medio nublado Nublado
Visibilidad
 Limpio Humo Bruma Polvo
Viento
 Quieto Brisa Viento intenso

Comentarios del operador

Figura 2.5
Hoja de registro empleada

2.4 OBTENCION DE ESPECTROS MEDIANTE PIXE

Una vez terminado el periodo de muestreo, se montaron los filtros en marcos portatransparencias, cuidando siempre de identificar el lado donde se localizaba el depósito de partículas. Cada portatransparencia se identificó según el filtro que contuviera.

Para aplicar la técnica PIXE se empleó el Acelerador Van de Graaff 5.5 MV. Las características de la cámara de irradiación son las siguientes: un detector de Si(Li) con una resolución de 140 eV a 5.9 keV; se empleó un filtro de Mylar constituido por dos películas de $(12 \pm 1) \mu\text{m}$ de espesor cada una. La energía del haz fue de 2.2 MeV y su corriente fue de 2 nA. La carga acumulada fue de 2.5 μC para cada filtro. Se empleó un amplificador de señal ORTEC 672 con una ganancia gruesa de 20 y una fina de 14.10; el tiempo de formación de pulsos de este equipo es de 2 μs . El sistema de vacío permitió alcanzar una presión de 10^{-4} torr.

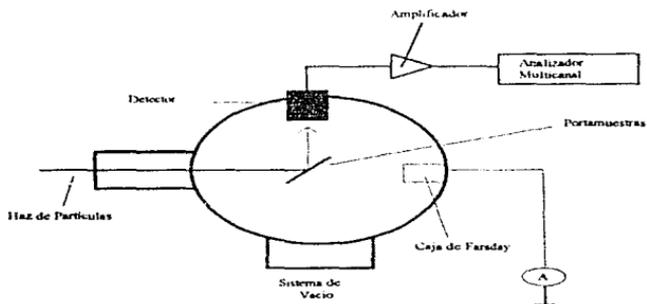


Figura 2.6

Cámara de irradiación para el análisis con PIXE

El portamuestras utilizado tiene lugar para cargar siete muestras a la vez, lo que permitió agilizar el análisis de los filtros.

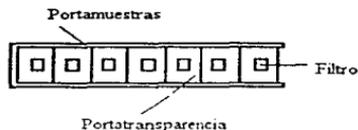


Figura 2.7
Esquema representativo del portamuestras

La técnica PIXE permite determinar concentraciones elementales a partir del número atómico 12 ($Z > 12$) y detecta el número de veces que se emitieron los fotones característicos de cada elemento; de este modo se obtendrán curvas o picos que tienden a ser gaussianas además de un fondo de rayos X. Los picos obtenidos dependen de los rayos X emitidos, ya que pueden obtenerse del tipo K_{α} , K_{β} y para algunos elementos hasta del tipo L, dependiendo de la masa del elemento (ver Apéndice A).

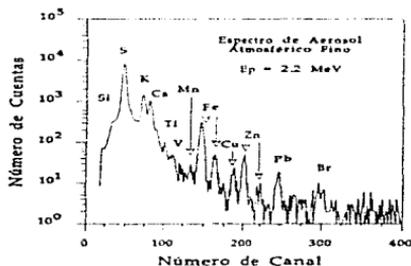


Figura 2.8
Espectro de una muestra de aerosoles atmosféricos, obtenido con PIXE. Se muestran los elementos correspondientes a cada línea de rayos X encontrada.

2.5 CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES ELEMENTALES

El programa AXIL permite formular un modelo, obtenido del análisis de los filtros limpios, que facilite el ajuste del ruido y las gaussianas. Del mismo modo, AXIL cuantifica el área existente bajo la curva correspondiente a cada elemento; esta área es proporcional a la concentración del mismo; así se tiene que:

$$N_x = \varepsilon Q C \sigma_x, \quad (2.1)$$

donde:

- N_x = área del pico [número de cuentas]
- Q = carga aplicada a la muestra [μC]
- C = concentración del elemento [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]
- σ_x = probabilidad de producir rayos X
- ε = eficiencia del detector

Tanto la eficiencia del detector, ε , así como el valor de la probabilidad de producir rayos X, σ_x , son desconocidas; por lo que se ha definido a la sensibilidad, $k(Z)$, como:

$$k(Z) = \varepsilon \sigma_x, \quad (2.2)$$

donde:

$$k(Z) = \text{sensibilidad para cada elemento} \left[\frac{\text{Número de cuentas}}{(\mu\text{g}/\text{cm}^2) \cdot (\mu\text{C})} \right]$$

Z = número atómico

La incertidumbre de la sensibilidad se expresa como:

$$\delta k(Z) = \sqrt{\left(\frac{\delta N_x}{Q C}\right)^2 + \left(\frac{N_x \delta C}{Q C^2}\right)^2}, \quad (2.3)$$

o bien:

$$\delta k(Z) = \frac{N_x}{QC} \sqrt{\left(\frac{\delta N_x}{N_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2} \quad (2.4)$$

siendo

$\delta k(Z)$ = incertidumbre de la sensibilidad

δN_x = incertidumbre del número de cuentas

δC = incertidumbre de la concentración del elemento

Es así que existe un valor de sensibilidad para cada elemento. Este valor se determinó usando patrones, es decir, películas con depósitos de compuestos de concentración conocida; los patrones analizados se enlistan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1
Patrones empleados

PATRON	ESPESOR [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] $\pm 5\%$	CARGA [μC]
Mn	48.7	0.5
Fe	52.8	0.5
Ni	47.0	0.5
Cu	45.0	1.0
Zn	38.0	1.0
ZnTe	44.6	1.0
Ge	45.4	0.5
Al	45.4	1.5
SiO	46.9	0.5
GaP	44.1	0.5
CuS _x	Cu=42.8 S=12.0	0.5
NaCl	47.2	0.5
KI	45.1	0.5
CaF ₂	49.4	0.5
SeF ₃	26.0	0.5
Ti	52.8	0.5
V	44.4	0.5
Cr	46.8	0.5
CdSe	28.5	0.5
TiCl	51.5	0.5
Pb (1)	46.2	0.5
Pb (2)	40.0	0.5
Bi	45.2	0.5

De este modo, se obtuvieron sensibilidades experimentales para cada elemento; sin embargo, fue necesario corregir estos valores, debido a algunos problemas relacionados con la cámara de análisis.

El primer problema que se presentó fue la ligera curvatura que posee el portamuestras. Este incidente ocasionó que, al usar el patrón de hierro en distintas posiciones, la sensibilidad obtenida para cada una de ellas fuera distinta, a pesar de que deberían ser iguales. Al graficar la sensibilidad en función de la posición que el patrón ocupó en el portamuestras se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 2.9.

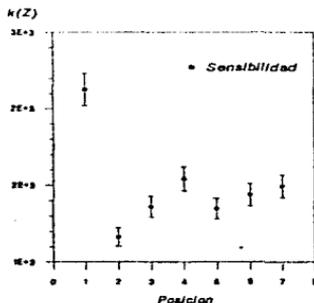


Figura 2.9

Gráfica de $k(Z)$ del hierro a distintas posiciones

Con base en este criterio, se decidió corregir las sensibilidades utilizando para ello un factor de corrección, f_p , (factor de corrección por posición). Este factor consistió en tomar la sensibilidad del patrón de hierro en la posición 2 como referencia y

dividir todas las sensibilidades de hierro en las distintas posiciones entre la sensibilidad de referencia:

$$f_P = \frac{k_P(Z)}{k_R(Z)}, \quad (2.5)$$

Donde:

$k_P(Z)$ = sensibilidad del hierro en distintas posiciones $p = 1, 2, \dots, 7$

$k_R(Z)$ = sensibilidad del hierro en la posición 2 (posición de referencia)

Por otro lado, también se observó que al analizar diferentes días el patrón de hierro en la posición 2, la sensibilidad obtenida fue distinta; esto se debió a que la energía del haz no fue la misma para cada día. La corrección correspondiente a este efecto se basó en calcular un factor de corrección, f_D , que se definió como:

$$f_D = \frac{k_2^D(Z)}{k_2^R(Z)}, \quad (2.6)$$

donde:

$k_2^D(Z)$ = sensibilidad del hierro en la posición 2 para cada día de análisis

$k_2^R(Z)$ = sensibilidad del hierro en la posición 2 del primer día (día de referencia)

Una vez calculados los factores de corrección, se obtuvieron los valores de sensibilidad corregida para cada elemento. A partir de estos valores se realizó un ajuste de la curva obtenida. Este ajuste consistió en dividir la curva experimental en dos partes, la primera se sometió a un ajuste correspondiente a un polinomio de 2o. grado, considerando que esta parte de la curva está comprendida entre $Z = 13$ y $Z = 19$, la ecuación obtenida es:

$$\ln k(Z) = -0.226Z^2 + 8.07Z - 63 \quad (2.7)$$

La segunda parte, que comprendió desde $Z = 22$ hasta el final, se ajustó como un polinomio de 1er. grado, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\ln k(Z) = -0.22Z + 13.2 \quad (2.8)$$

De este modo, las curvas de sensibilidad obtenidas para los elementos que sólo producen líneas K se grafican en la Fig. 2.10.

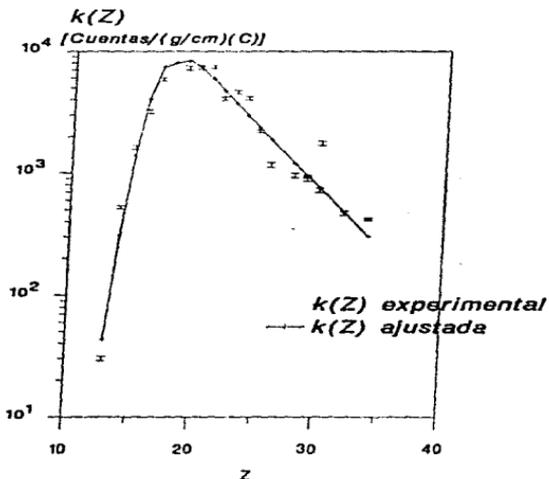


Figura 2.10
Gráfica de $k(Z)$ experimental y $k(Z)$ ajustada

La sensibilidad ajustada para los elementos que también producen líneas L se obtuvo mediante un ajuste. Una vez realizado el ajuste de la sensibilidad para cada elemento, fue posible calcular las concentraciones elementales para cada muestra. Para este efecto, fue necesario obtener los espectros de las muestras mediante PIXE; después de analizarlos con ayuda del programa AXIL se obtuvieron los valores de N_x para los elementos contenidos en cada muestra. De este modo:

$$C = \frac{N_x}{Qk(Z)} \cdot f_D, \quad (2.9)$$

$$\delta C = \frac{N_x}{Qk} \sqrt{\left(\frac{\delta N_x}{N_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta k(Z)}{k(Z)}\right)^2}; \quad (2.10)$$

a partir de la ecuación 2.10 se calcularon otros tipos de incertidumbres:

$$S_A = \frac{S}{n}, \quad (2.11)$$

$$S_B = \frac{1}{n} \sqrt{(\delta C_1)^2 + (\delta C_2)^2 + \dots + (\delta C_n)^2}, \quad (2.12)$$

$$S_T = \sqrt{S_A^2 + S_B^2}, \quad (2.13)$$

en las que:

S = desviación típica

S_A = incertidumbre tipo A

S_B = incertidumbre tipo B

S_T = incertidumbre total

n = número de muestras $n = 1, 2, \dots, 64$

δC = incertidumbre de la concentración de un elemento

La incertidumbre tipo A es de carácter estadístico, y corresponde a la desviación típica de la media de las concentraciones, en tanto que la incertidumbre tipo B se refiere a la obtenida mediante el modelo matemático involucrado con el experimento. La incertidumbre total corresponde a una combinación de la incertidumbre tipo A y tipo B, (Taylor B. N., et al. 1994).

Con la finalidad de expresar las concentraciones en ng/m^3 , fue necesario calcular el volumen total de aire que se manejó durante cada muestreo. Con este fin se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_m = \left(\frac{F_i + F_f}{2} \right) \cdot t_m \quad (2.14)$$

donde:

V_m = volumen total de aire para cada muestra [m^3] $m = 1, 2, \dots, 64$

F_i = flujo de aire al inicio del muestreo [L/min]

F_f = flujo de aire al final del muestreo [L/min]

t_m = tiempo de muestreo [min]

Posteriormente, se aplicó la siguiente ecuación:

$$C_{fm} = \frac{C \cdot A}{V_m} \quad (2.15)$$

para la que:

C_{fm} = concentración final del elemento en la muestra [ng/m^3]

A = área de cada filtro: para filtros 8NUC el área es de 17.35 cm^2
para filtros 4NUC el área es de 4.91 cm^2

Como se mencionó anteriormente, los datos meteorológicos fueron obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), y consistieron en valores de

dirección y velocidad del viento, así como de humedad relativa; con estos parámetros y las concentraciones obtenidas se calcularon matrices de correlación. Se ha encontrado que un factor de correlación alto entre dos concentraciones indica que ambas provienen de la misma fuente, sin embargo, la influencia de los parámetros atmosféricos es determinante en este análisis, ya que el valor del factor de correlación obtenido puede modificarse por el efecto de dichos parámetros. Este efecto puede observarse directamente al analizar el factor de correlación calculado para una concentración y un parámetro meteorológico, ya que si su valor es alto, entonces se podrá concluir que entre ellos existe una relación muy importante.

Los valores de la dirección y velocidad del viento proporcionados por la RAMA consisten en lecturas realizadas cada hora, por lo que, para calcular las matrices de correlación, se calcularon los valores promedio de cada uno de los parámetros. Estos análisis se realizaron para los tres distintos periodos de muestreo (mañana, tarde y noche) y para el día completo. Es decir, para los periodos de 9:00 horas a 15:00 horas, y de 15:00 horas a 21:00 horas; se calculó un promedio de seis valores de velocidad de viento y humedad relativa registrados para las horas correspondientes al periodo. Para el periodo de 21:00 horas a 9:00 horas, el promedio se calculó para los doce valores registrados por la RAMA durante ese tiempo. En relación a la dirección del viento, el procedimiento es el mismo, sin embargo, es necesario aclarar que para obtener dichos promedios se descompuso cada vector de velocidad en sus componentes V_x y V_y ; de este modo se obtuvieron valores promedio de V_x y V_y .

El procesamiento de los datos de viento que se sigue para fines climatológicos trabaja fundamentalmente con valores medios de rapidez y dirección. En general este comportamiento medio resuelve la mayor parte de los problemas climatológicos; sin embargo, en los problemas de arrastre de contaminantes en la atmósfera ocurre que las partículas son arrastradas en la dirección real del viento y no en la dirección del viento medio. Es por esto que se dibujaron rosas de los vientos para los tres periodos y para el periodo completo de muestreo, con la finalidad de detectar cuál es la dirección y velocidad del viento predominante. Para la elaboración de las rosas de viento se siguió el siguiente criterio: *"una rosa de los vientos representativa de los cambios en un lugar debe brindar información acerca de las repeticiones de la misma dirección y rapidez del viento simultáneamente"* (Alvarez M. R. 1983)

Esto es, cada velocidad del viento tiene una representación igual al porcentaje de ocurrencia de la misma en un periodo de tiempo dado.

Sin embargo, no fue posible seguir este criterio para los periodos del día, ya que los datos de velocidad del viento para cada uno de ellos no eran suficientes para dibujar una rosa de los vientos representativa. El criterio antes descrito sólo se aplicó para trazar rosas del periodo total de muestreo, en tanto que, para los demás periodos, las rosas de los vientos obtenidas sólo son representativas de la frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento.

CAPITULO 3

**RESULTADOS Y
DISCUSION**

Los promedios de las concentraciones elementales obtenidas como resultado de analizar con PIXE los aerosoles, se presentan en las tablas 3.1 y 3.2. Los promedios de las 64 muestras se obtuvieron para cada período del día y para el período completo, lo anterior con la finalidad de distinguir el comportamiento de cada una de las concentraciones durante el transcurso del día. Adjunta a esta información, se proporcionan los promedios de la masa gravimétrica.

Es importante recordar, que gracias a la naturaleza del muestreador se logró obtener una distribución de tamaños; por lo que fue posible determinar concentraciones tanto para la fracción fina de los aerosoles, como para la fracción gruesa. Siendo que PIXE permite analizar únicamente elementos de Z mayor a 12, los elementos detectados en todas las muestras, o en la mayoría de ellas fueron: Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Br y Pb.

La concentración de bromo obtenida en cada uno de los períodos, es notoriamente alta; la razón de estas concentraciones estriba en el hecho de que los filtros empleados para la colección de los aerosoles contenían una contaminación no despreciable de este elemento, lo anterior se comprobó al analizar dos filtros limpios.

Debido a este problema, resulta difícil poder analizar el comportamiento de las concentraciones de este elemento, ya que, si bien la cantidad de bromo obtenida para cada período puede corresponder a la emitida por la gasolina y la incineración de basura en la ZMCM, es imposible definir qué porción de las concentraciones medidas corresponde a la contaminación atmosférica y cuál es atribuible a la contenida inicialmente por cada uno de los filtros.

Tabla 3.1
Concentraciones elementales [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para las partículas finas

	[ng/m^3]	[ng/m^3]	[ng/m^3]	[ng/m^3]
	9:00 h a 15:00 h	15:00 h a 21:00 h	21:00 h a 9:00 h	Total
m/V [mg/m^3]	0.033 \pm 0.005	0.040 \pm 0.005	0.074 \pm 0.005	0.021 \pm 0.005
Al	950 \pm 47	830 \pm 45	350 \pm 42	720 \pm 18
Si	1300 \pm 52	1100 \pm 44	360 \pm 22	960 \pm 18
S	2600 \pm 64	1500 \pm 47	780 \pm 17	1700 \pm 21
Cl	100 \pm 2.8	110 \pm 3.1	55 \pm 1.7	94 \pm 1.30
K	140 \pm 4.6	100 \pm 2.2	66 \pm 1.7	110 \pm 1.3
Ca	340 \pm 10	280 \pm 6.3	100 \pm 4.2	250 \pm 3.1
Ti	30 \pm 1.8	26 \pm 1.0	9 \pm 0.54	23 \pm 0.54
V	18 \pm 1.6	11 \pm 0.9	7 \pm 0.40	12 \pm 0.47
Cr	32 \pm 1.1	35 \pm 1.1	18 \pm 0.83	29 \pm 0.49
Mn	34 \pm 1.0	30 \pm 0.9	11 \pm 0.38	26 \pm 0.42
Fe	490 \pm 11.1	350 \pm 7.1	150 \pm 4.8	340 \pm 3.7
Cu	24 \pm 1.0	11 \pm 0.7	12 \pm 0.60	16 \pm 0.42
Zn	210 \pm 6.2	130 \pm 8.3	74 \pm 3.9	140 \pm 2.7
Pb	100 \pm 5.1	61 \pm 3.2	59 \pm 2.5	76 \pm 2.0

Tabla 3.2
Concentraciones elementales [ng/m³] para la fracción gruesa

	[ng/ m ³] 9:00 h a 15:00 h	[ng/ m ³] 15:000 h a 21:00 h	[ng/ m ³] 21:00 h a 9:00 h	[ng/ m ³] Total
m/V [mg/m³]	0.040 ±0.005	0.021 ±0.005	0.008 ±0.005	0.023 ±0.005
Al	2100 ±120	1100 ±110	700 ±74	1200 ±37
Si	2400 ±62	2000 ±61	1000 ±38	1800 ±21
S	920 ±13	440 ±11	300 ±8.7	460 ±4.3
Cl	300 ±7.0	260 ±5.2	170 ±3.3	260 ±2.2
K	120 ±3.7	110 ±2.7	82 ±3.7	100 ±1.2
Ca	670 ±20	610 ±16	240 ±14	780 ±6.9
Ti	70 ±3.0	47 ±1.5	21 ±1.1	46 ±0.80
V	22 ±1.2	23 ±2.0	14 ±0.67	20 ±0.54
Cr	76 ±2.0	49 ±1.3	31 ±0.89	51 ±0.62
Mn	41 ±1.3	25 ±0.84	22 ±0.66	29 ±0.39
Fe	720 ±14	540 ±7.5	312 ±9.3	530 ±4.4
Cu	19 ±0.77	14 ±0.92	7.0 ±0.51	12 ±0.32
Zn	101 ±2.7	51 ±2.2	40 ±1.9	56 ±0.88
Pb	61 ±3.3	18 ±1.8	23 ±1.7	28 ±1.0

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los promedios correspondientes a todo el periodo de muestreo, (del 14 de agosto al 14 de septiembre de 1995). Al comparar las concentraciones de estas tablas¹, puede identificarse una diferencia marcada entre los valores correspondientes a los aerosoles de origen natural. Para la fracción fina, las

¹Dado que el comportamiento de cada una de las concentraciones de los elementos a lo largo de cada periodo de muestreo, no corresponde al tema de esta tesis, sólo se analizará el comportamiento de las concentraciones elementales promedio correspondientes al periodo total del muestreo; el estudio de cada periodo de muestreo puede consultarse en (Crespo S. 1. 1996).

concentraciones de Al, Si, Ca, Ti y Fe son considerablemente menores que las encontradas en la fracción gruesa; lo anterior coincide con lo esperado, ya que los aerosoles con estas características corresponden a partículas de polvo (suelo). El hierro encontrado en la fracción fina proviene de la industria (fundidoras). El efecto que pueden provocar en la salud de los seres vivos es prácticamente despreciable, ya que, las partículas mayores a $2.5 \mu\text{m}$ y menores de $15 \mu\text{m}$ tienen una velocidad de asentamiento alta (0.3 cm/s), por lo que el aire las arrastra durante periodos relativamente cortos, pero debe señalarse que contribuyen a reducir la visibilidad al dispersar y absorber la luz incidente sobre la Tierra.

Sin embargo, el resultado más interesante, es el referente a los aerosoles antropogénicos. Como se mencionó en el capítulo I, son los aerosoles generados por el hombre los que más daño causan a la salud de los seres vivos.

En este caso, se puede observar que las concentraciones de Pb, Cu, Zn y S son mayores en la fracción fina que las encontradas en la fracción gruesa.

El plomo detectado en las partículas finas proviene del consumo de gasolina adicionada con plomo por motores de combustión interna; por otro lado, el observado en la fracción gruesa proviene de la misma fuente; la diferencia de tamaño se debe a que las partículas finas de este elemento se integran y depositan en las avenidas en tamaños mayores, posteriormente este depósito es levantado por los automotores.

Con base en este razonamiento, puede entenderse que la cantidad de plomo encontrado en la fracción fina corresponda a casi tres veces la concentración del mismo elemento relativa a la fracción gruesa, ya que en la ZMCM existe una gran cantidad de automotores que consumen gasolina con plomo.

Las partículas emitidas por la combustión interna son de tamaño muy pequeño; por lo que su desplazamiento en la atmósfera corresponde a un largo periodo de tiempo (tienen una velocidad de asentamiento muy baja, ya que varía entre $0.04 \mu\text{m/s}$ y $4 \mu\text{m/s}$). Esta característica es de gran importancia ya que la mayoría de las veces, este contaminante es absorbido por un organismo vivo antes de depositarse en el suelo.

El comportamiento del zinc es similar al del plomo, su concentración en la fracción fina corresponde a más del doble de la encontrada para las partículas de tamaño

mayor a 2.5 μm . Al analizar la procedencia de ambos tamaños de partículas de este elemento, se sabe que el zinc encontrado dentro de la fracción fina es generado por los incineradores y la industria química; en cambio, el generado por las fundidoras es de un tamaño mayor por lo que la fracción gruesa de este elemento corresponde a estas fuentes.

Cerca del sitio de muestreo no existen fuentes locales de este tipo, por lo que la procedencia de este tipo de partículas debe corresponder a fuentes externas (este aspecto se analizará más adelante)

En el caso del cobre, la variación es mínima, no así para el azufre, ya que presentó dentro de las partículas finas, la concentración más alta de todos los elementos, en tanto que, en la fracción gruesa su concentración resultó ser menos de la tercera parte de la encontrada en la fina

La razón de este comportamiento radica en el hecho de que el azufre es un subproducto de la combustión interna de automotores que consumen gasolina y diesel, así como fuentes fijas, (como plantas termoeléctricas y petroquímicas), consumidoras de combustóleo y carbón.

El hecho de encontrar una gran cantidad de azufre en la fracción fina constituye un problema serio en relación a los efectos que puede provocar (mencionados en el capítulo 1), ya que se sabe que aerosoles de este tipo causan una pronunciada reducción de la visibilidad; aspecto altamente notorio para los habitantes de la ZMCM en los últimos años. Una importante fracción del sulfato presente en el aire urbano de la ZMCM presenta una distribución de tamaño alrededor de 0.2 μm y 0.9 μm . Como la longitud de onda del rango visible del espectro electromagnético varía aproximadamente dentro de un intervalo con valores de 0.4 μm a 0.8 μm ; la presencia de aerosoles de este tipo es un factor primordial en lo que respecta a la luz incidente.

El cromo y el vanadio se comportaron en forma distinta a la esperada, ya que a pesar de ser elementos derivados de reacciones químicas, la concentración obtenida de ellos dentro de la fracción fina resultó ser ligeramente menor a la encontrada para la gruesa. El cromo de tamaño menor a 2.5 μm proviene principalmente de procesos de incineración y combustión, en tanto que el encontrado dentro de la fracción gruesa corresponde a procesos metalúrgicos

En relación al vanadio, es importante señalar que, debido a que las partículas finas de este elemento son generadas por la combustión de diesel o combustóleo, se esperaba que la concentración dentro de esta fracción fuera más alta que la respectiva para la fracción gruesa, sin embargo, se encontró una cantidad de vanadio mayor dentro de las partículas de tamaño grande.

Por otro lado, es importante hacer notar que en general, las concentraciones de los contaminantes de origen natural predominan sobre aquellos de origen humano. Al efectuar un cálculo sencillo es posible observar que dentro de la fracción gruesa, los elementos antropogénicos aportan un 29% del total de la concentración de las partículas analizadas; sin embargo, este comportamiento no debe ser motivo de tranquilidad, ya que dentro de la fracción fina los elementos antropogénicos constituyen el 47% del total de la masa de las partículas colectadas; siendo esta categoría la que tiene la capacidad de introducirse a los pulmones, es necesario alertar a las autoridades con la finalidad de que canalizen sus esfuerzos para disminuir no sólo la carga de partículas suspendidas totales sino de bajar las concentraciones de las partículas comprendidas dentro de la fracción fina.

En la Ciudad de México, los aerosoles atmosféricos son controlados mediante criterios internacionales para la evaluación del aire, que consisten en

Tabla 3.3
Criterios internacionales para la evaluación del aire
(Secretariado técnico Intergubernamental, 1990)

PM10	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	en 24 horas
PST	275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	en 24 horas
Pb	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	promedio en 3 meses

El término PM10 se refiere a las partículas suspendidas menores de 10 μm de diámetro, en tanto que PST cuantifica las partículas suspendidas totales.

Debido a la distribución de tamaños lograda durante el muestreo, resulta imposible comparar los criterios de evaluación con las concentraciones obtenidas, ya que el único valor que es posible obtener es el PM15, es decir, partículas menores de 15 μm de diámetro. De este modo, para el trabajo realizado, se obtuvo un valor de 0.044 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que es considerablemente bajo, incluso comparado con el criterio de PM10 que comprende menos partículas que las colectadas durante el muestreo, este resultado se debe, en gran medida, a las frecuentes e intensas lluvias presentadas durante casi todo el mes de agosto y parte de septiembre. La lluvia ocasiona el depósito de las partículas suspendidas, además de compactar el suelo evitando que el viento las levante.

En un principio resulta muy interesante realizar comparaciones entre los resultados obtenidos de la experimentación y aquellos reportados por otros autores; sin embargo, a pesar de que este tipo de análisis comienza a tomar fuerza en México, fue difícil encontrar estudios, que en base a su criterio de diseño, puedan ser comparados con este trabajo.

Con la finalidad de establecer una relación válida entre los distintos estudios, sólo se seleccionaron aquéllos que correspondan a un procedimiento experimental similar al realizado para este estudio. En función a lo anterior, se exponen a continuación los resultados reportados por (Andrade F., et al. 1994). Este estudio se realizó en la zona metropolitana de São Paulo, ZMSP, región con condiciones semejantes a la ZMCM, ya que es considerada como la zona industrial más grande de Latinoamérica, con una alta densidad poblacional, y por ende con un grave problema de contaminación atmosférica. Durante el muestreo utilizaron unidades de filtros apilados con filtros de *Nuclepore* con poros de tamaño de 0.4 μm y 8 μm . Los resultados presentados corresponden a los promedios correspondientes al periodo completo de muestreo y se reportan valores para la fracción fina y para la gruesa. El muestreo se realizó del 18 de junio al 8 de agosto de 1989, (invierno).

En ambas fracciones predominan las concentraciones de aerosoles naturales sobre las de los antropogénicos. La cantidad total de partículas de origen natural determinada para la ZMSP supera a la detectada para la ZMCM. Es notoria la diferencia entre el comportamiento de la fracción fina y la gruesa para ambos estudios. Las concentraciones de Al, Si, Ca, Ti y Fe detectadas en la ZMCM para la fracción fina, son mayores que las correspondientes al estudio de (Andrade F., et al. 1994); a pesar de

que el clima durante el muestreo en la ZMSP fue predominantemente seco, al contrario del presentado en la Ciudad de México; sin embargo, las concentraciones de estos elementos en la fracción gruesa se comportan de manera contraria. La justificación de este comportamiento radica en el hecho de que el material particulado de origen natural de la ZMSP proviene principalmente de un suelo arenoso con tamaño de partícula grande.

Respecto al cloro, se esperaba que las concentraciones detectadas en la ZMSP fueran marcadamente mayores a las de la ZMCM, sin embargo, este pronóstico solo fue válido para la fracción gruesa, en la que se observa claramente la contribución de la sal marina a este tipo de aerosoles; no así para las partículas de la fracción fina, en las que las concentraciones de este contaminante son mayores para la ZMCM. Resulta difícil explicar las razones por las que el cloro se comporta de esta forma en dicha zona.

En un principio se creyó que podría ser producto de fuentes externas y que debido al viento fue acarreado hasta el sitio de muestreo, debe considerarse que el origen de este elemento no es natural. En la ZMCM se siguen utilizando insecticidas y plaguicidas cuyos principios activos son compuestos derivados de cloro, por lo que no puede descartarse que también el consumo de tales productos signifique una fuente no despreciable de este elemento. Sin embargo, la principal fuente emisora la constituyen las industrias químicas que emplean al cloro dentro de sus procesos.

La concentración de potasio proporcionada por el estudio de la ZMSP fue mayor para ambas fracciones que la obtenida en la ZMCM, la fuente de este elemento en ZMSP es el mar; no obstante que el potasio también se encuentra en el suelo y es un componente del humo.

El comportamiento de las concentraciones de V, Cu y Zn muestran una gran similitud, este tipo de contaminación es característico de la existencia de fuentes industriales.

La comparación entre el plomo detectado en ambos estudios es muy interesante. México es un país con poca eficiencia en el uso de energéticos, por lo que existe una relación significativa entre el consumo total de gasolina y el volumen total de plomo; sin embargo, es importante señalar la introducción de la gasolina *Magna-sin* (gasolina con bajo contenido en plomo o sin él).

Tabla 3.4

Comparación realizada entre los estudios realizados en la ZMCM y la ZMSP, todas las concentraciones en $[ng/m^3]$

	FRACCION FINA		FRACCION GRUESA	
	ZMCM	ZMSP	ZMCM	ZMSP
$[mg/m^3]$	0.021	0.037	0.023	0.061
Al	720	130	1200	1600
Si	960	290	1800	2900
S	1700	2000	460	880
Cl	94	46	260	520
K	110	430	100	570
Ca	250	110	780	1600
Ti	23	12	46	150
V	12	16	20	15
Mn	26	34	29	55
Fe	340	280	530	1700
Cu	16	16	12	32
Zn	140	110	56	130
Pb	76	58	28	42

Por otro lado, São Paulo tiene cerca de 4 millones de automóviles, de los que la mitad consumen alcohol y la otra mitad una mezcla de gasolina y 22% de alcohol. Sin embargo, aún cuenta con 300,000 vehículos que consumen diesel. Aún así, es de esperarse que la concentración de plomo sea mayor en la ZMCM que en la ZMSP. Es posible observar que para la fracción fina, la concentración determinada para este elemento en la ZMCM es mayor que la correspondiente para la ZMSP; sin embargo de nuevo ocurre un comportamiento contrario para la fracción gruesa. Con anterioridad se mencionó que el plomo obtenido dentro de la fracción fina corresponde al emitido por los automóviles que consumen gasolina, en tanto que el contenido en la fracción gruesa proviene del polvo levantado de las avenidas. La concentración de plomo predominante en la fracción de partículas mayores a $2.5 \mu m$ se debe a que el muestreo en la ZMSP se efectuó en un clima seco lo que propició el levantamiento del polvo.

Para la fracción fina se puede observar como la emisión de plomo en la ZMCM a pesar de ser mayor que en la ZMSP, esta diferencia no es muy marcada en parte debido a la temporada de lluvias que se presentó durante el muestreo en la ZMCM así como también debido al uso de la nueva gasolina y la implantación del programa *Hoy no circula* (un día a la semana sin auto)

Otro estudio, que puede utilizarse para comparar los resultados obtenidos, es el presentado en (Aldape E., et al. 1991), consiste en un muestreo realizado en la Ciudad de México, en el Bosque de Chapultepec, durante la primera semana de noviembre de 1988. Las muestras fueron colectadas por periodos de 6 horas; a pesar de que difiere del procedimiento de muestreo utilizado en el presente trabajo, proporciona concentraciones promedio correspondientes a todo el periodo de muestreo.

Tabla 3.5
Comparación entre el estudio de Ciudad Universitaria y el realizado en el Bosque de Chapultepec, todas las concentraciones en [ng/m³].

Elemento	Ciudad Universitaria	Chapultepec
Al	1920	985
Si	2760	2228
S	1160	843
Cl	354	37
K	210	224
Ca	1030	1111
Ti	69	55
V	32	51
Cr	80	3
Mn	55	18
Fe	870	554
Cu	28	20
Zn	196	115
Pb	104	326

Ambas experimentaciones se realizaron en otoño, por lo que las condiciones climáticas son muy similares. Los resultados obtenidos en el Bosque de Chapultepec en 1988 tienen el mismo comportamiento que los observados en Ciudad Universitaria en 1995. Los elementos provenientes del polvo levantado del suelo, como lo son el Al, Si, K, Ca y Ti, se encuentran en mayor cantidad que aquellos de origen humano. Es importante destacar que las concentraciones de Pb y V correspondientes al estudio de Chapultepec son mayores a las observadas en Ciudad Universitaria. Como se sabe, estos elementos provienen del consumo de gasolina, el estudio efectuado en 1995 muestra claramente los efectos positivos de el programa *Hoy no circula* y de la introducción de la gasolina *Magna-sin*

Se encontraron una gran cantidad de publicaciones² relacionadas con análisis de aerosoles atmosféricos mediante PIXE; sin embargo, los dispositivos empleados para la colección de las muestras es muy diversa, así como lo es también los periodos de muestreo. Ambos aspectos varían mucho los resultados obtenidos, ya que existen periodos en los que la concentración de contaminantes es más alta que en otros, debido a las condiciones meteorológicas y a la gran cantidad de actividad humana e industrial; del mismo modo, la obtención de distintas distribuciones de tamaño afectan mucho los resultados ya que los aerosoles comprenden tamaños de partículas desde 0.001 μm hasta 500 μm .

El tema principal de esta tesis corresponde al estudio de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre los aerosoles atmosféricos de la ZMCM. Para este fin se efectuó un análisis estadístico conocido como *Análisis de Cúmulos*.

Este análisis consistió en determinar los coeficientes de correlación existentes entre todas las posibles combinaciones de pares de variables involucradas en el análisis. En función a este principio, se propusieron como variables cada una de las concentraciones elementales para los distintos periodos de muestreo y para el periodo total; también se incluyeron los valores de los parámetros meteorológicos correspondientes a los periodos antes mencionados. De este modo, se formó una matriz en la que cada uno de sus componentes corresponde a un factor de correlación entre dos variables. El coeficiente de correlación de cada par de variables es una representación directa de la forma en que los valores de ambas variables se ajustan a

² Estas publicaciones pueden encontrarse en las referencias (Miranda J. en prensa (a)), (Miranda, J. et al. en prensa (b)), (Aldape, F., et al. 1991), (Miranda, J., et al. 1996).

una línea recta, cuando se grafican. Así, un factor de correlación de valor absoluto igual a uno indica que todos los puntos graficados caen sobre la recta; conforme el valor absoluto se aproxime a cero se podrá inferir que el número de puntos que se ajustan a la recta también disminuye, cuando se presenta un factor de correlación igual a cero significa que ninguno de los puntos ha caído sobre la recta.

El cálculo de las matrices de correlación se efectuó con ayuda de un programa de cómputo llamado *Statistica* (Statsoft Inc. 1991).

A continuación se presentan en las tablas 3-6 a 3-13 las matrices de correlación para cada uno de los periodos de muestreo: matutino, vespertino y nocturno; así como la matriz correspondiente al periodo total.

Del análisis directo de las matrices de correlación se pueden identificar grupos de contaminantes entre los que existe una alta correlación. El criterio que se decidió tomar para considerar un valor alto de correlación es aquél que tenga un valor igual o mayor a 0.5. Los valores de correlación altos sugieren la existencia de grupos comunes entre sí. Por ejemplo, si se observa la tabla 3-6 podrán distinguirse factores de correlación altos entre Si, K, Ca, Ti y Fe; es así que se ha obtenido un grupo, que corresponde a los aerosoles de origen natural. Del mismo modo, se puede obtener otro grupo integrado por el Zn y Cu, como se sabe, ambos elementos son liberados a la atmósfera por las industrias y fundidoras. El azufre se correlaciona altamente con el Pb y el V, este resultado coincide con lo esperado, ya que los tres componentes provienen del consumo de combustibles, ya sea gasolina, diesel o incluso carbón. En este caso, también se puede observar que la humedad relativa, H.R., se relaciona ligeramente con la componente x de la velocidad, V_x , en tanto que la componente y de la velocidad, V_y se relacionó altamente con la velocidad del viento, V .

Sin embargo, el *Análisis de Cúmulos*, sugiere una forma más fácil de identificar dichos grupos. Para este fin se usa el método de Ward y la regla de Pearson para la medición de las distancias. El propósito de estos métodos es trazar un diagrama representativo de una matriz de correlación, a este diagrama se le llama Dendograma.

Tabla 3.6
Matriz de correlación para la fracción fina
Periodo total

	V.V.	Vx	Vy	H.R.	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.377	1.00																	
Vy	0.716	-0.252	1.00																
H.R.	-0.612	0.486	-0.285	1.00															
Al	0.171	-0.153	0.051	-0.297	1.00														
Si	0.392	-0.394	0.238	-0.436	0.103	1.00													
S	-0.080	-0.255	-0.221	-0.278	0.031	0.208	1.00												
Cl	0.163	-0.175	0.066	-0.104	-0.017	0.456	0.264	1.00											
K	0.237	-0.381	0.217	-0.345	-0.044	0.706	0.377	0.494	1.00										
Ca	0.516	-0.487	0.393	-0.591	0.107	0.742	0.275	0.314	0.631	1.00									
Ti	0.353	-0.430	0.193	-0.389	0.067	0.704	0.152	0.215	0.483	0.745	1.00								
V	0.001	-0.291	-0.098	-0.181	0.081	0.141	0.641	0.063	0.249	0.167	0.173	1.00							
Cr	0.215	-0.217	-0.013	-0.298	0.134	0.288	0.376	0.419	0.280	0.307	0.260	0.433	1.00						
Mn	0.237	-0.271	0.020	-0.370	0.158	0.355	0.472	0.343	0.405	0.495	0.401	0.304	0.561	1.00					
Fe	0.313	-0.449	0.147	-0.493	0.119	0.697	0.476	0.316	0.590	0.861	0.808	0.323	0.356	0.691	1.00				
Cu	-0.075	-0.299	-0.019	-0.191	0.213	0.237	0.482	0.191	0.249	0.272	0.254	0.122	0.152	0.361	0.439	1.00			
Zn	0.031	-0.249	0.100	-0.041	0.067	0.304	0.471	0.468	0.393	0.273	0.182	0.238	0.376	0.492	0.377	0.545	1.00		
Br	0.151	-0.312	-0.118	-0.290	0.049	0.360	0.562	0.443	0.301	0.429	0.224	0.202	0.305	0.435	0.491	0.214	0.323	1.00	
Pb	-0.272	-0.226	-0.297	0.054	-0.053	0.070	0.613	0.068	0.327	0.097	0.121	0.461	0.301	0.413	0.338	0.477	0.444	0.314	1.00

Tabla 3.7
 Matriz de correlación para la fracción gruesa
 Periodo total

	VV	Vx	Vy	HR	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
VV	1.00																		
Vx	-0.376	1.00																	
Vy	0.708	-0.252	1.00																
HR	-0.607	0.485	-0.292	1.00															
Al	0.192	-0.287	0.123	-0.23	1.00														
Si	0.059	-0.199	-0.175	-0.317	0.313	1.00													
S	-0.188	-0.151	-0.388	0.004	0.182	0.395	1.00												
Cl	-0.014	-0.254	-0.374	-0.303	0.119	0.407	0.717	1.00											
K	-0.011	-0.074	-0.179	-0.144	0.203	0.489	0.502	0.294	1.00										
Ca	0.144	-0.240	-0.011	-0.548	0.256	0.611	0.443	0.417	0.545	1.00									
Ti	0.057	-0.156	-0.021	-0.250	0.345	0.515	0.284	0.153	0.519	0.604	1.00								
V	0.010	-0.050	-0.223	-0.132	0.000	0.263	0.179	0.289	0.126	0.099	0.124	1.00							
Cr	-0.075	-0.194	-0.245	-0.217	0.252	0.234	0.505	0.572	0.110	0.338	0.221	0.366	1.00						
Mn	-0.108	-0.180	-0.264	-0.191	0.073	0.327	0.577	0.700	0.236	0.384	0.156	0.411	0.620	1.00					
Fe	0.001	-0.238	-0.187	-0.394	0.311	0.701	0.552	0.533	0.516	0.859	0.590	0.240	0.462	0.547	1.00				
Cu	0.034	-0.048	0.098	0.036	0.067	0.136	0.334	0.237	0.232	0.211	0.124	-0.060	0.004	0.144	0.168	1.00			
Zn	-0.157	-0.138	-0.171	-0.077	-0.036	0.329	0.584	0.349	0.433	0.525	0.181	0.059	0.204	0.470	0.517	0.263	1.00		
Br	0.132	-0.323	-0.178	-0.411	0.253	0.461	0.606	0.705	0.403	0.562	0.423	0.150	0.542	0.576	0.610	0.291	0.391	1.00	
Pb	-0.132	-0.216	-0.136	-0.141	0.250	0.236	0.388	0.403	0.232	0.215	0.015	-0.112	0.225	0.106	0.222	-0.085	0.136	0.234	1.00

Tabla 3.8
 Matriz de correlación para la fracción fina
 9:00 h a 15:00 h

	V.V.	Vx	Vy	H.R.	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.620	1.00																	
Vy	0.590	0.100	1.00																
H.R.	-0.280	0.200	-0.160	1.00															
Al	-0.190	0.080	-0.210	0.220	1.00														
Si	0.370	-0.180	0.410	-0.380	-0.060	1.00													
S	-0.430	0.130	-0.270	-0.090	0.050	-0.100	1.00												
Cl	0.000	0.050	0.260	-0.040	-0.230	0.470	-0.130	1.00											
K	0.260	-0.200	0.360	-0.220	-0.280	0.750	0.050	0.610	1.00										
Ca	0.610	-0.170	0.640	-0.330	-0.220	0.770	-0.100	0.190	0.470	1.00									
Ti	0.300	-0.240	0.140	-0.270	-0.120	0.730	-0.020	0.060	0.370	0.740	1.00								
V	0.010	-0.240	-0.150	-0.180	0.160	0.150	0.710	-0.150	0.160	0.070	0.130	1.00							
Cr	0.220	-0.220	0.100	-0.220	-0.110	0.180	0.640	-0.160	0.280	0.230	0.130	0.730	1.00						
Mn	-0.080	0.210	0.100	-0.180	-0.090	0.050	0.400	-0.400	0.100	0.230	0.170	0.300	0.360	1.00					
Fe	0.270	-0.020	0.370	-0.300	-0.090	0.630	0.180	-0.080	0.310	0.810	0.850	0.300	0.280	0.530	1.00				
Cu	-0.220	0.510	0.180	-0.190	0.050	0.030	0.480	-0.180	-0.030	0.110	0.130	0.140	0.320	0.330	0.330	1.00			
Zn	-0.080	0.200	0.280	-0.030	0.070	0.220	0.570	-0.150	0.270	0.280	0.160	0.370	0.380	0.470	0.410	0.540	1.00		
Br	-0.060	0.040	-0.140	0.060	0.130	-0.170	0.310	0.070	-0.210	-0.060	-0.180	0.040	0.030	-0.130	-0.130	0.070	0.090	1.00	
Pb	-0.290	0.200	-0.110	0.230	0.050	-0.170	0.650	-0.240	0.140	-0.190	-0.050	0.550	0.480	0.330	0.110	0.520	0.550	-0.100	1.00

Tabla 3.9
Matriz de correlación para la fracción gruesa
9:00 h a 15:00 h

V.V.	Vx	Vy	HR	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb	
V.V.	1.00																		
Vx	-0.629	1.00																	
Vy	0.590	0.100	1.00																
HR	-0.280	0.200	-0.160	1.00															
Al	-0.010	-0.080	-0.050	-0.050	1.00														
Si	-0.040	-0.110	-0.180	-0.340	0.410	1.00													
S	-0.380	0.050	-0.450	0.090	0.270	0.260	1.00												
Cl	-0.170	-0.180	-0.480	-0.180	0.110	0.300	0.680	1.00											
K	-0.180	-0.010	-0.430	-0.350	0.290	0.640	0.450	0.380	1.00										
Ca	-0.320	0.430	-0.070	-0.500	0.360	0.520	0.270	0.290	0.560	1.00									
Ti	-0.090	0.330	0.000	-0.080	0.260	0.430	0.100	-0.050	0.530	0.500	1.00								
V	-0.290	-0.100	-0.600	-0.100	0.070	0.250	0.330	0.360	0.320	0.210	0.180	1.00							
Cr	-0.230	0.060	-0.320	-0.050	0.350	0.080	0.580	0.440	0.250	0.340	0.040	0.390	1.00						
Mn	-0.290	0.070	-0.370	-0.240	0.050	0.330	0.470	0.760	0.270	0.460	0.070	0.440	0.580	1.00					
Fe	-0.310	0.260	-0.220	-0.190	0.490	0.650	0.470	0.480	0.490	0.830	0.450	0.350	0.420	0.620	1.00				
Cu	-0.170	0.320	0.250	-0.210	0.030	0.130	-0.020	-0.100	0.100	0.450	0.110	-0.330	-0.190	0.090	0.230	1.00			
Zn	-0.440	0.210	-0.190	-0.130	-0.130	0.420	0.550	0.330	0.270	0.420	0.050	0.210	0.290	0.540	0.480	0.410	1.00		
Br	-0.200	0.100	-0.300	-0.090	0.180	0.380	0.630	0.650	0.620	0.380	0.210	0.090	0.370	0.610	0.450	0.280	0.400	1.00	
Pb	-0.100	-0.150	-0.100	-0.100	0.450	0.220	0.380	0.410	0.200	0.020	-0.130	-0.140	0.210	-0.010	0.110	-0.290	-0.070	0.130	1.00

Tabla 3.10
 Matriz de correlación para la fracción fina
 15:00 h a 21:00 h

	V.V.	Vx	Vy	H.R.	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.670	1.00																	
Vy	0.830	-0.680	1.00																
H.R.	-0.590	0.530	-0.350	1.00															
Al	0.200	-0.260	0.100	-0.540	1.00														
Si	0.280	-0.360	0.130	-0.140	0.050	1.00													
S	-0.200	0.180	-0.180	0.110	-0.200	0.040	1.00												
Cl	-0.230	0.010	-0.170	0.410	-0.120	0.250	0.280	1.00											
K	0.140	-0.310	0.240	-0.070	0.050	0.510	0.420	0.320	1.00										
Ca	0.430	-0.610	0.400	-0.690	0.240	0.490	0.090	0.020	0.650	1.00									
Ti	0.380	-0.650	0.380	-0.200	0.230	0.510	-0.220	0.020	0.370	0.550	1.00								
V	-0.150	-0.040	-0.090	0.020	-0.080	-0.130	0.630	0.150	0.330	0.070	0.030	1.00							
Cr	-0.050	-0.120	-0.070	-0.110	0.370	0.210	0.080	0.600	0.110	0.100	0.130	0.100	1.00						
Mn	0.040	-0.100	0.010	0.020	0.340	0.330	0.070	0.490	0.510	0.360	0.390	0.120	0.550	1.00					
Fe	0.170	-0.370	0.140	-0.200	0.090	0.530	0.180	0.250	0.740	0.790	0.630	0.160	0.150	0.640	1.00				
Cu	0.270	-0.200	0.200	0.120	0.230	0.320	-0.010	0.440	0.260	0.200	0.430	-0.160	0.230	0.380	0.250	1.00			
Zn	-0.020	-0.100	0.130	0.360	0.010	0.170	0.170	0.740	0.350	-0.120	-0.050	0.070	0.460	0.350	-0.050	0.550	1.00		
Br	-0.300	-0.120	-0.110	0.240	-0.250	0.390	0.550	0.250	0.570	0.360	0.180	0.310	0.040	0.230	0.510	-0.010	0.170	1.00	
Pb	-0.330	-0.080	-0.020	0.410	-0.130	0.170	0.310	0.300	0.410	0.120	0.230	0.290	0.110	0.330	0.260	-0.060	0.200	0.620	1.00

Tabla 3.11
 Matriz de correlación para la fracción gruesa
 15:00 h a 21:00 h

	V.V.	Vx	Vy	H.R.	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.670	1.00																	
Vy	0.830	-0.680	1.00																
H.R.	-0.590	0.530	-0.350	1.00															
Al	0.480	-0.320	0.380	-0.270	1.00														
Si	-0.270	0.100	-0.240	0.120	0.070	1.00													
S	-0.320	0.160	-0.360	0.420	-0.170	0.220	1.00												
Cl	-0.340	0.140	-0.500	0.010	-0.260	0.230	0.670	1.00											
K	-0.030	0.030	0.150	0.220	0.000	0.240	0.410	-0.070	1.00										
Ca	-0.040	-0.100	0.010	-0.170	-0.020	0.440	0.320	0.140	0.640	1.00									
Ti	0.050	-0.130	0.130	-0.070	0.440	0.460	0.150	-0.070	0.490	0.580	1.00								
V	-0.030	0.030	-0.190	-0.120	-0.100	0.300	0.060	0.250	0.040	-0.040	0.030	1.00							
Cr	-0.360	0.230	-0.450	0.040	-0.110	0.110	0.180	0.470	-0.350	-0.160	-0.010	0.360	1.00						
Mn	-0.070	0.040	-0.220	0.040	-0.270	0.060	0.490	0.660	0.010	-0.050	-0.190	0.480	0.570	1.00					
Fe	-0.320	0.090	-0.270	0.020	-0.110	0.640	0.370	0.320	0.490	0.710	0.470	0.270	0.130	0.160	1.00				
Cu	-0.130	0.030	0.050	0.530	-0.010	-0.020	0.550	0.310	0.320	-0.080	-0.020	-0.060	-0.140	0.160	-0.020	1.00			
Zn	-0.170	0.000	-0.150	0.260	-0.170	0.030	0.600	0.160	0.750	0.560	0.180	-0.060	-0.200	0.210	0.390	0.180	1.00		
Br	0.030	0.140	-0.110	-0.160	0.130	0.090	0.490	0.610	0.240	0.220	0.340	0.180	0.390	0.470	0.300	0.180	0.160	1.00	
Pb	-0.070	-0.100	-0.090	-0.230	-0.180	0.220	0.290	0.340	0.250	0.440	0.100	-0.170	0.110	0.100	0.260	-0.130	0.330	0.430	1.00

Tabla 3.12
 Matriz de correlación para la fracción fina
 21:00 h a 9:00 h

	V.V.	Vx	Vy	HR	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.080	1.00																	
Vy	0.950	-0.160	1.00																
HR	-0.700	0.320	-0.710	1.00															
Al	0.300	0.090	0.220	-0.230	1.00														
Si	0.630	0.290	0.550	-0.270	0.390	1.00													
S	0.240	-0.400	0.170	-0.430	0.110	-0.030	1.00												
Cl	-0.100	0.010	0.020	-0.070	0.060	0.050	-0.130	1.00											
K	0.580	0.160	0.530	-0.300	0.170	0.540	0.340	-0.020	1.00										
Ca	0.650	0.320	0.620	-0.280	0.330	0.730	0.080	-0.140	0.810	1.00									
Ti	0.490	0.210	0.360	-0.210	0.140	0.790	-0.060	-0.040	0.690	0.660	1.00								
V	0.180	0.060	0.210	-0.420	0.020	0.130	0.340	0.140	0.070	0.100	0.220	1.00							
Cr	-0.150	0.080	-0.170	-0.090	-0.240	-0.040	-0.030	0.060	0.110	0.040	0.400	0.470	1.00						
Mn	0.020	-0.070	0.090	-0.140	-0.450	-0.160	0.300	0.100	0.380	0.200	0.120	0.400	0.590	1.00					
Fe	0.570	0.240	0.490	-0.270	0.290	0.820	0.050	-0.030	0.800	0.870	0.810	0.060	0.220	0.230	1.00				
Cu	0.040	-0.410	0.030	-0.120	0.510	-0.160	0.080	0.110	0.000	-0.040	-0.210	-0.430	-0.330	-0.260	-0.010	1.00			
Zn	0.060	0.000	0.110	0.200	-0.020	0.000	0.050	-0.140	0.320	0.290	-0.090	-0.360	-0.290	0.280	0.280	0.210	1.00		
Br	-0.410	0.530	-0.480	0.370	-0.020	0.000	-0.330	0.100	-0.120	-0.020	0.020	0.090	0.340	0.230	0.140	-0.140	0.050	1.00	
Pb	-0.460	-0.190	-0.520	0.280	-0.340	-0.410	0.230	-0.400	0.080	-0.130	-0.070	-0.170	0.240	0.390	-0.010	0.170	0.340	0.260	1.00

Tabla 3.13
 Matriz de correlación para la fracción gruesa
 21:00 h a 9:00 h

	V.V.	Vx	Vy	H.R.	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb
V.V.	1.00																		
Vx	-0.080	1.00																	
Vy	0.950	-0.160	1.00																
H.R.	-0.700	0.320	-0.710	1.00															
Al	0.110	0.030	0.010	-0.070	1.00														
Si	0.120	-0.170	-0.040	-0.010	0.400	1.00													
S	-0.330	-0.110	-0.350	0.340	0.350	0.560	1.00												
Cl	0.090	-0.160	-0.020	0.190	0.550	0.150	0.570	1.00											
K	-0.320	0.090	-0.400	0.110	0.260	0.540	0.730	0.400	1.00										
Ca	0.160	-0.160	0.130	-0.230	0.100	0.570	0.380	-0.040	0.410	1.00									
Ti	-0.240	0.100	-0.240	-0.070	0.140	0.420	0.470	-0.120	0.640	0.480	1.00								
V	0.040	-0.010	0.210	-0.070	0.220	-0.200	0.230	0.280	-0.030	-0.150	0.080	1.00							
Cr	0.130	-0.070	0.280	-0.210	0.230	-0.300	0.190	0.410	0.010	-0.240	0.060	0.880	1.00						
Mn	-0.050	-0.200	0.030	0.070	0.470	0.410	0.760	0.500	0.370	0.370	0.250	0.500	0.360	1.00					
Fe	0.020	-0.160	-0.040	-0.210	0.060	0.680	0.510	-0.080	0.630	0.890	0.680	-0.100	-0.210	0.390	1.00				
Cu	-0.020	-0.330	-0.020	0.060	0.160	0.020	0.180	0.430	0.160	-0.290	-0.140	0.200	0.250	-0.060	-0.300	1.00			
Zn	-0.060	-0.260	-0.050	0.130	0.080	0.340	0.330	0.200	0.310	0.490	-0.030	0.020	-0.130	0.380	0.480	-0.050	1.00		
Br	-0.200	0.140	-0.260	0.710	0.050	0.100	0.230	0.190	-0.170	-0.230	-0.250	-0.040	-0.130	0.150	-0.270	-0.010	0.040	1.00	
Pb	-0.150	-0.280	-0.110	0.100	0.080	0.160	0.390	0.360	0.360	0.320	0.130	-0.130	-0.130	0.090	0.190	0.480	0.220	-0.010	1.00

De este modo, se obtuvieron ocho dendogramas para cada uno de los periodos de muestreo tanto para la fracción fina como para la gruesa. Así, si se analiza la figura 3.1 podrá observarse que el estudio realizado a partir de la matriz de correlación mostrada en la tabla 3.6 es coherente con lo representado por dicho diagrama, en el que se puede distinguir un grupo formado por el Fe, Ti, Ca y Si. Este grupo se relaciona con el integrado por V_j y V_j' . El otro grupo claramente distinguido es el formado por el Pb, Zn, Cu, Mn, todos ellos relacionados fuertemente con el parámetro V_x . La fuerte relación dada entre los elementos de este último grupo sugiere la indudable procedencia de industrias químicas y metalúrgicas, dado que no existe ninguna fuente local de este tipo, su procedencia se explica por el efecto del viento que acarrea a los contaminantes desde fuentes externas hasta el sitio de muestreo. El último grupo está constituido por el Cr, V y S. Se sabe que el Cr puede provenir de la industria o bien del consumo de combustibles industriales como el diesel.

Sin embargo, el hecho de encontrarlo junto con el V y el S, confirma que este grupo está conectado con el uso de diesel. Este grupo fue también registrado en el trabajo presentado en (Miranda J., et al. en prensa (b)).

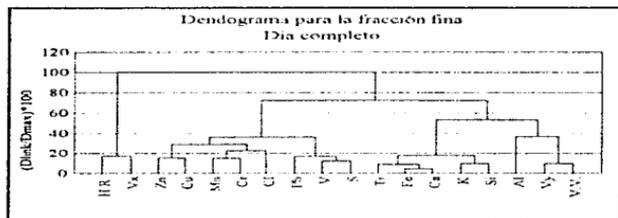


Figura 3.1

Dendrograma para la fracción fina correspondiente al periodo total

El dendrograma para la fracción gruesa (fig. 3.2), obtenido para todo el periodo de muestreo, presenta un poco más clara la separación de los grupos distinguidos en la

figura 3.1. Es así que se observan dos grandes grupos: los elementos de origen natural (Ti, K, Fe, Ca, y Si) y los antropogénicos (Cu, V, Zn, Mn, Cr, Cl y S). Este último grupo se caracteriza por relacionar fuertemente: al Cl con el S; al Cr con el Mn; y a ambos pares. El encontrar al Cl y al S juntos permite proponer una fuente común entre ambos, que en este caso correspondería a la actividad industrial. El Cr y el Mn tienen una fuente común, y al relacionarse con el grupo anterior, indica que la fuente es la misma para ambos grupos.

Se observa un pequeño grupo formado por el aluminio y el plomo que no se relaciona con ningún otro elemento. El resultado esperado, era encontrar al aluminio dentro del grupo de los elementos de origen natural, mientras que el plomo debería estar cerca de los aerosoles antropogénicos; sin embargo, para la fracción gruesa, esta hipótesis no es del todo válida puesto que las concentraciones de Pb son muy bajas, debido a que la mayoría de las emisiones de este elemento se distribuyen en la fracción fina. Por otro lado, el bajo número de mediciones para el Al, junto con su alta incertidumbre explican que este elemento no se comporte de acuerdo a lo esperado.

Los parámetros meteorológicos dentro de ambas fracciones se comportan de la misma forma. Los cuatro parámetros constituyen grupos por separado; la Vx y Vy se encuentran sumamente ligadas y en la fracción fina se puede observar que este grupo se encuentra acompañando a los elementos de origen natural en tanto que Vx y $H.R.$ aparecen siempre junto a los elementos de origen humano.



Figura 3.2

Dendrograma para la fracción gruesa correspondiente al periodo total.

Sin embargo, retomando lo expuesto en el capítulo 2, el procesamiento del promedio de la velocidad y dirección del viento resulta una aproximación válida para fines climatológicos. El uso de esta aproximación para resolver problemas de arrastre de contaminantes en la atmósfera puede incurrir en algunos errores. Con la finalidad de confirmar esta propuesta, se dibujaron rosas de los vientos, (histogramas), características para cada periodo del día; que representan las frecuencias de cada dirección del viento registrada. En un principio se trató de dibujar rosas de los vientos representativas de los cambios no sólo de la dirección, sino también de la rapidez del viento para cada periodo; pero no fue posible elaboraflas más que para el periodo total de muestreo, dado que la cantidad de datos disponibles de velocidad del viento para los otros períodos es muy pequeña, y por lo tanto, las rosas de los vientos obtenidas serían poco representativas.

Así, en la figura 3.3 se muestran las rosas de los vientos dibujadas para tres clases de velocidades, que se definieron de acuerdo al orden de su magnitud, estas clases son: velocidades menores a 1 m/s; velocidades entre un intervalo comprendido de 1 m/s y 2 m/s; Velocidades mayores a 2 m/s.

Las velocidades predominantes durante el muestreo fueron las correspondientes al intervalo comprendido entre 1 m/s y 2 m/s, siendo la dirección norte, la que presentó una frecuencia mayor. Sin embargo, cuando el viento es menor a 1 m/s la dirección del viento predominante corresponde al este.

Para los vientos más fuertes, es decir, $V > 2$ m/s mayores de 3 m/s la dirección que se presentó con más frecuencia fue la correspondiente al noroeste.

De acuerdo al mapa de localización presentado en el capítulo 2, el sitio de muestreo se localiza al suroeste de la ZMCM, como se mencionó anteriormente, se ubica dentro de una zona residencial con poca actividad industrial, cercano a una reserva ecológica y a dos avenidas con alta afluencia vehicular, durante ciertos periodos del día: el Anillo Periférico localizado al oeste, y la Avenida Insurgentes al oeste y suroeste. La única industria que se puede considerar una fuente local, es la planta de asfalto localizada cerca de estadio Azteca, es decir, al este de Ciudad Universitaria. La mayor cantidad de industrias en la ZMCM se localizan al norte y noroeste.

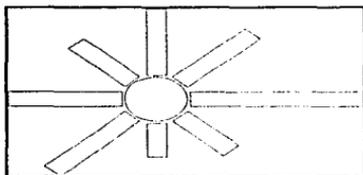


Figura 3.3.a

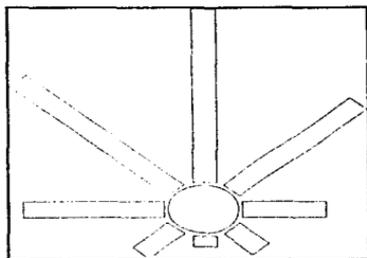


Figura 3.3.b

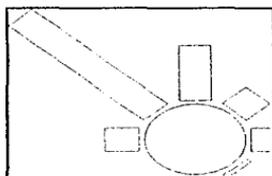


Figura 3.3.c

Figura 3.3

Rosa de los vientos del periodo total de muestreo para V.V.: a) menores a 1 m/s b) entre 1 m/s y 2 m/s c) velocidades mayores de 3 m/s

Retomando los resultados presentados en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 y en las tablas 3.1 y 3.2; se observa que las concentraciones más altas para el periodo total en ambas fracciones corresponden a los contaminantes de origen natural y si la dirección del viento predominante corresponde al norte; entonces es posible que la concentración tan

alta de estos contaminantes sea una consecuencia del levantamiento del polvo del suelo del norte y su posterior acarreamiento hacia el sur.

En relación a los elementos antropogénicos, y considerando que son en la fracción fina donde presentan una concentración más alta debido a la naturaleza de los procesos a partir de los cuales se generan; la conclusión más factible que se puede deducir es que el hecho de que el parámetro de I^* se encuentre próximo a estos elementos, significa que ya sea al este, o al oeste del sitio de muestreo existen fuentes externas que generen este tipo de contaminantes.

Las conclusiones obtenidas del análisis de la fracción fina y gruesa totales, no son del todo claras debido a que, como se mencionó anteriormente, los contaminantes se acarrean en la dirección y velocidad del viento real y no en el promedio de éstos parámetros. Además de que no es la misma contribución de cada una de las fuentes en distintos periodos del día.

El dendograma obtenido para la fracción fina en el periodo matutino (9:00 horas a 15:00 horas), (figura 3.4), proporciona una información clara de los contaminantes y los grupos que forman; así como su relación con los parámetros meteorológicos.

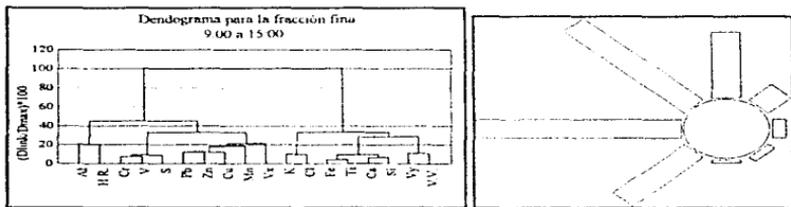


Figura 3.4

Dendrograma para la fracción fina para el periodo de 9:00 h a 15:00 h y rosa de los vientos correspondiente a ese periodo.

El A1 no presenta una correlación alta con todas las demás variables, debido a que se encontró en pocas muestras durante este periodo además de que la incertidumbre

para este elemento es muy alta. El primer grupo bien definido es el integrado por el Cr, V y S, los tres elementos son emitidos por fuentes que consumen combustibles industriales como lo son el diesel y el carbón, e incluso por el consumo de gas natural. Muy cerca de este grupo se localizan el Pb, Zn, Cu, Mn y Vx, tales contaminantes son originados por industrias y fundidoras, el Pb proviene de los automotores principalmente, por lo que no se esperaba dentro de este grupo, sin embargo, su presencia marca claramente la influencia que Vx ejerce sobre estos elementos

Elementos de origen natural se agrupan claramente: Fe, Ti, Ca y Si, todos provenientes de particulado del suelo levantado por el viento. El K y el Cl se localizan en un mismo grupo; para el K los incendios constituyen una fuente que contribuye al incremento de su concentración y el Cl proviene de la actividad industrial; de este modo, no existe una fuente que tengan en común por lo que se puede definir como una fuente indeterminada. La rosa de los vientos obtenida para la mañana indica que la dirección predominante del viento es del oeste

Si la dirección del viento indica que éste principalmente proviene del oeste, entonces la contaminación antropogénica proviene de fuentes externas que se localizan en este punto. La figura 3.4 muestra que la dirección noroeste también tiene una contribución importante. De este modo, las emisiones de Zn, Cu y Mn de la fracción fina de los aerosoles proviene de las industrias localizadas en esos puntos, en tanto que el Pb encontrado proviene de las emisiones de los automotores que circulan por las avenidas alledañas mencionadas con anterioridad. El Cr, V y S, presenta una relación con Vx muy ligera, sin embargo existente, lo que ratifica su procedencia de las fuentes antes mencionadas

Las variables Vy y VV acompañan al grupo de los elementos provenientes del suelo, principalmente al Fe, Ti, Ca y Si; sin embargo, es necesario conocer su comportamiento a lo largo de otros periodos para establecer la forma en que se da esta relación.

Para la fracción gruesa (Fig. 3.5), se observa un comportamiento semejante. Existe una relación clara entre Vx y el grupo constituido por los elementos originados principalmente por fundidoras (Cu y Zn), este comportamiento se ratifica con la rosa de los vientos, donde se ve claramente que la contaminación por estos elementos proviene de las mismas industrias emisoras de los contaminantes de la fracción fina.

El grupo de elementos provenientes del suelo se encuentra muy bien definido a excepción del Mn. Sin embargo, el hecho de que éste último se encuentre más relacionado con el Cl, elemento de origen industrial, indica que la mayor contribución a las concentraciones de este elemento corresponde a fuentes de este tipo. Otro grupo pequeño es el formado por el S y el Cr, ambos procedentes del consumo de diesel.

El Pb es un elemento que se encuentra en mayor cantidad en la fracción fina que en la gruesa. Por tal motivo, no se encontró una relación importante de este elemento con los contaminantes antropogénicos.

Los parámetros $V.I.$ y I_y se correlacionan únicamente entre sí y en esta ocasión no se presentan junto a los elementos componentes el suelo; lo que indica que no influyen en la contaminación emitida durante la mañana.

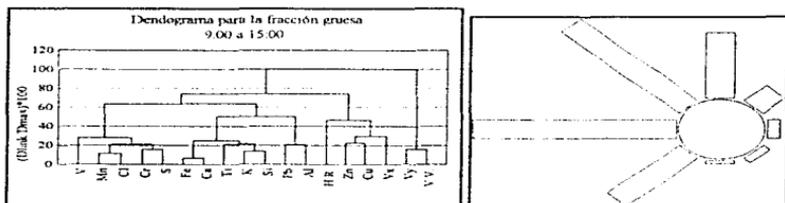
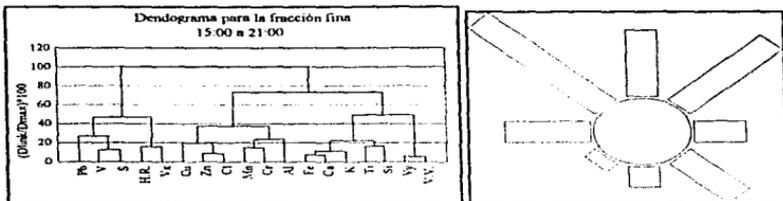


Figura 3.5

Dendrograma para la fracción gruesa del periodo de 9:00 h a 15:00 h y rosa de los vientos correspondiente a dicho periodo.

Durante la tarde, (de 15:00 h a 21:00 h), la dirección del viento cambia, siendo esta vez del noroeste (ver Fig. 3.6). En la fracción fina se ve claramente el efecto que produce este cambio sobre las concentraciones de elementos provenientes del suelo. Si en la mañana se observó que I_y y $V.I.$ se relacionaban con el grupo de los elementos provenientes del suelo; en la tarde esta relación se acentúa. En esta ocasión dicho grupo se define completamente, ya que el K se integra a él.



Dendrograma para la fracción fina de 15:00 h a 21:00 h y rosa de los vientos de dicho periodo.

Por otro lado, Vx aparece ligeramente relacionada al grupo proveniente del consumo de combustibles, lo que indica que el Pb, V y S presentes en la fracción fina provienen del tráfico vehicular de las avenidas cercanas. Existe otro grupo proveniente de la industria y está constituido por Zn y Cl, relacionados ambos con el Cu; este grupo se relaciona ligeramente con el Mn, Cr y Al.

En la fracción gruesa (fig.3.7) se detectan grupos menos definidos; el correspondiente al suelo está constituido por Ti, Fe, Ca y Si, únicamente. El K se encuentra agrupado con el Zn y este grupo con el Pb, el origen de estos elementos no puede determinarse con precisión, ya que el K está asociado únicamente al humo de biomateria; sin embargo, si el Zn se genera de la incineración doméstica, entonces este grupo pertenece a este tipo de fuente; la presencia de Pb podría explicarse debido a sus bajas concentraciones. El grupo formado por Mn, Cr y V, perteneciente a fuentes que consumen combustibles industriales, no presenta una relación importante con otros grupos; sin embargo se encuentra ligeramente ligado al grupo del Cu, Cl y S. Este último grupo tiene como origen la actividad industrial. La influencia que ejerce el grupo integrado por Vx y H.R. en la fracción fina no coincide con su comportamiento en la fracción gruesa, ya que en esta última se relacionan más con el grupo del Cu, Cl y S.

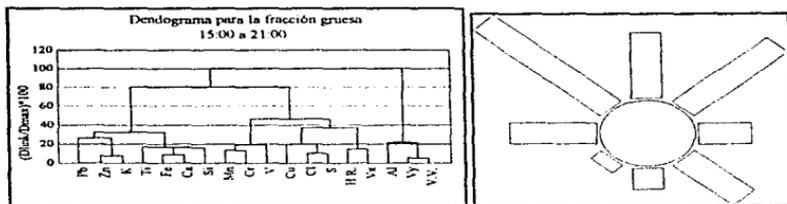


Figura 3.7

Dendrograma para la fracción gruesa y rosa de los vientos para el periodo de 15:00 h a 21:00 h.

En la figura 3.8 se muestra el dendrograma correspondiente a la fracción fina colectada durante la noche. En él se observa una importante relación entre el grupo formado por *Vy y Vt*, con los elementos constituyentes del suelo: Fe, Ca, K, Ti y Si.

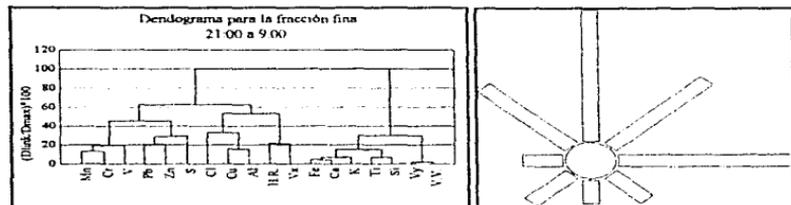


Figura 3.8

Dendrograma para la fracción fina y rosa de los vientos del periodo de 21:00 h a 9:00 h.

Por otro lado, el grupo integrado por *I'x* y *H.R.*, se relaciona muy poco con los elementos antropogénicos. El único grupo de este origen que puede relacionarse con estos parámetros es el constituido por el *Cl*, *Cu* y *Al*; ya que el grupo del *Mn*, *Cr*, y *V* se relaciona ligeramente sólo con el grupo constituido por el *Pb*, *Zn* y *S*; todos ellos procedentes de industrias.

La rosa de los vientos característica de este periodo muestra que el viento proveniente del norte es el que predomina en la noche; sin embargo no puede descartarse la frecuencia que se presentó en la dirección este. En función a estas condiciones y tomando como base los resultados mostrados por la figura 3.8, es posible distinguir que el viento proveniente del norte es el que más influencia ejerce sobre los contaminantes provenientes del suelo. Por otro lado, la concentración del *Cl*, *Cu* y *Al* está ligada con el viento proveniente del este.

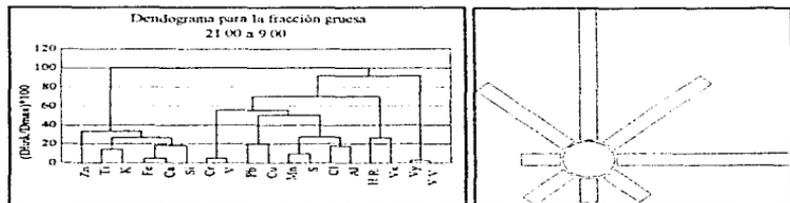


Figura 3.9

Dendrograma para la fracción gruesa y rosa de los vientos correspondientes al periodo de 21:00 h a 9:00 h.

En lo que respecta a la fracción gruesa no se observa ninguna influencia de los grupos *I'x* y *H.R.*, así como *I'y* y *V.V.* sobre los demás grupos. El *Ti*, *K*, *Fe*, *Ca* y *Si* se relacionan significativamente, lo que, al igual que en todos los demás casos antes analizados demuestra el origen común que tienen estos elementos. El comportamiento de los elementos antropogénicos no demuestra una estrecha relación entre cada uno de

ellos; sin embargo, los grupos identificados consisten en parejas, tales grupos son: Cr y V (provenientes principalmente del consumo de diesel); Pb y Cu (fuentes industriales), Mn y S (fuente no determinada) y Cl y Al (grupo no determinado).

Para finalizar, es importante destacar la alta relación que se encontró en la mayoría de los dendogramas entre los parámetros meteorológicos. El hecho de que V_x y $H.R.$ se presentaran siempre en el mismo grupo permite suponer que la humedad relativa de la atmósfera del suroeste de la ZMCM proviene de la precipitación de la zona del Ajusco y la Sierra del suroeste, que es acarreada por el viento. El grupo formado por V_y y V_z establece que las velocidades más altas del viento provienen de la zona norte.

Se esperaba que la planta de asfalto, situada al este del sitio de muestreo influyera considerablemente en las emisiones encontradas en las muestras, sin embargo, no fue así. La principal razón de este hecho radica en el comportamiento del viento. De acuerdo a las rosas trazadas para todos los periodos, para que la contaminación proveniente de esta fuente (principalmente azufre) llegara a Ciudad Universitaria, se requiere que durante los periodos de calma (velocidades de viento entre 0 m/s y 1 m/s), la dirección predominante sea del este, y que las calmas sean, al mismo tiempo la condición predominante del viento. Ambas condiciones no se presentan; ya que como se mencionó con anterioridad, la condición del viento predominante son las velocidades comprendidas entre 1 m/s y 2 m/s, y en este caso la dirección que presentó la frecuencia más alta es la del norte.

CAPITULO 4
CONCLUSIONES

El empleo de la técnica PIXE para la caracterización de aerosoles atmosféricos posee un potencial enorme en México, debido a los graves problemas de contaminación atmosférica que afectan a las principales ciudades del país. Esta técnica tiene una gran capacidad para la determinación de concentraciones elementales en muestras colectadas, y ofrece un campo muy diverso en lo que respecta a las técnicas de colección de muestras.

Las partículas de los aerosoles atmosféricos más importantes debido a los efectos dañinos que producen a la salud son de carácter antropogénico. El origen de estas partículas define en gran medida la distribución de sus tamaños. Se encontró que la mayoría de los elementos contaminantes derivados de las actividades humanas presentan las concentraciones más altas dentro de la fracción menor de $2.5 \mu\text{m}$; a pesar de que estas partículas son de tamaño respirable, sus bajas concentraciones en el suroeste de la ZMCM no ponen en riesgo inminente a los habitantes. Sin embargo, es importante tomar en consideración el efecto de la humedad relativa en los elementos contaminantes de este tipo, de este modo, la baja concentración de estos últimos puede deberse al efecto de lavado que produce la lluvia sobre los aerosoles atmosféricos. Un análisis de muestras sólidas del suelo de la ZMCM podría confirmar esta propuesta.

Las altas concentraciones de elementos en PM15 procedentes del polvo levantado del suelo por el viento, como lo son el Fe, Ti, Ca, y Si resaltan la gravedad del problema de deforestación existente. La relación entre estos elementos y los vientos del norte, indica que la fuente que más contribuye a este tipo de contaminación continúa siendo el Lago de Texcoco.

Los esfuerzos realizados por el gobierno para obtener un incremento de la eficiencia en el consumo de energéticos comienzan a dar resultado, pues es evidente que las concentraciones de Pb en las partículas suspendidas se encuentran considerablemente por debajo de los criterios de evaluación de la contaminación atmosférica; gracias a la introducción de la gasolina con bajo contenido de este elemento. No obstante, la detección del Pb se caracterizó por su presencia en dos grupos distintos (el grupo del

combustóleo y el diesel, y el grupo de la industria), según el período, se presentan dos razones. el efecto que el viento en la dirección noroeste y oeste tienen sobre este contaminante, y el omitir al Br de los análisis, ya que tanto este último como el Pb provienen de los automotores que consumen gasolina (las principales avenidas con este tipo de vehículos se localizan al oeste del sitio de muestreo)

La determinación del grupo integrado por el Cr, V y S, elementos provenientes del uso de combustóleo y diesel, y sobre todo, la alta concentración de S en los aerosoles de la fracción fina debe estimular el interés del gobierno por elevar la pureza de dichos energéticos a fin de reducir las emisiones contaminantes.

A pesar de que la relación entre los elementos antropogénicos es notoria, la determinación de una fuente común entre elementos emitidos por industrias no fue posible, ya que cada una de ellas sigue procesos completamente distintos.

Sin embargo, fue posible identificar una fuente común en el período comprendido entre las 9:00 h y las 15:00 h para el Cu, Zn y Mn procedentes de las industrias metalúrgicas situadas al noroeste y oeste de la ZMCM

Durante este período se observó la estabilidad dinámica de las partículas de fracción fina; ya que, a pesar de ser la velocidad promedio del viento no mayor a 1 m/s, el arrastre de los aerosoles atmosféricos desde el noroeste y oeste de la ZMCM se lleva a cabo sin ningún impedimento. Es importante señalar la clara distinción entre la procedencia de los elementos componentes del suelo en este período; ya que el Fe, Ti, Ca y Si provienen del norte de la ZMCM

Las concentraciones elementales en ambas fracciones, para las horas comprendidas entre las 3:00 P.M. y las 9:00 P.M. presentan valores menores que las caracterizadas para el primer período, lo que demuestra una clara influencia de la disminución de las actividades humanas sobre la emisión de partículas contaminantes. En este período la dirección predominante del viento es del noroeste con velocidades mayores de 2 m/s, lo que ratifica que el principal origen de los aerosoles atmosféricos son las fuentes externas ubicadas en este punto.

Sin embargo, es durante la noche cuando se presentan las concentraciones elementales más bajas de los aerosoles atmosféricos. Con este período se demuestra que

las partículas suspendidas provenientes del suelo llegan al sitio de muestreo acarreadas del viento del norte, en tanto que los elementos antropogénicos son emitidos por fuentes externas situadas al noroeste.

El acoplamiento de la técnica PIXE con el método estadístico de *Análisis de Cúmulos*, constituye una alternativa de gran valor e interés, en lo que respecta al análisis de aerosoles atmosféricos. El uso de valores promedio de los parámetros meteorológicos en el análisis estadístico fue satisfactorio, pero insuficiente; sin embargo, el trazo de las rosas de los vientos fue un complemento adecuado para realizar el estudio.

APENDICE

A. ESPECTROMETRIA PIXE

Es una técnica de origen nuclear basada en el uso de aceleradores de partículas. PIXE del inglés Particle Induced X-ray Emission (Emisión de rayos X inducida por partículas). Se refiere a un proceso combinado en el que se generan rayos X como resultado de colisiones entre las partículas que bombardean a los átomos de una muestra.

Con PIXE es posible realizar análisis multielemental (para números atómicos, Z, mayores que 12), obteniendo como resultado las concentraciones absolutas de la muestra que se desea analizar; cuenta con la ventaja de tener una alta sensibilidad por lo que, pueden determinarse trazas elementales con una muestra pequeña; además la preparación de las muestras es fácil y rápida.

Puede ser combinada con otras técnicas nucleares para detectar elementos más ligeros y tiene la característica de ser no destructiva. Durante el proceso analítico las muestras son sometidas a una transferencia de calor moderada equivalente a la pérdida de la energía del haz en la muestra; esta energía no ocasiona modificaciones apreciables al estado y composición de la muestra. La espectrometría PIXE se ha aplicado en campos muy diversos como lo son la ciencia de materiales, arqueología, geología, medicina e investigaciones ambientales, entre otros. A continuación se presentan los fundamentos básicos de la espectrometría PIXE y se describen el procedimiento del análisis cuantitativo y el dispositivo experimental utilizado en esta técnica.

A.1 FUNDAMENTOS BASICOS DE LA ESPECTROMETRIA PIXE

PIXE se basa en la ionización de las capas internas de un átomo (o blanco), originada por la incidencia de una partícula (también llamada proyectil), en este caso cargada positivamente. El ion incidente tiene energía suficiente para arrancar un electrón de una capa muy interna del átomo (ver figura A.1.1).

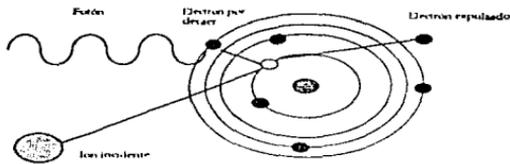


Figura A.1.1

Representación esquemática de la emisión de fotones de rayos X

Como consecuencia de la salida del electrón, se tendrá un ion en un estado de excitación muy alto con un nivel vacío y muchos otros niveles ocupados. A medida que los electrones se reacomodan en el átomo, se pueden emitir líneas de rayos X, dependiendo del nivel al que corresponden dichos electrones. La energía del fotón de rayos X emitido es característica del elemento en cuestión; de este modo la medición de dicha energía proporciona información directa del elemento tratado.

Un átomo se caracteriza por tener cuatro números cuánticos que se pueden definir como:

- n = número cuántico principal
- l = número cuántico azimutal
- m = número cuántico magnético
- s = número cuántico del espín

El número cuántico n ($n = 1, 2, 3, \dots$) puede tomar cualquier valor positivo diferente de cero, en tanto que l ($l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$) puede ser cero y no puede ser mayor que $n - 1$.

Es costumbre designar los valores de l por letras:

valor de l	0	1	2	3	4	5
letra correspondiente	s	p	d	f	g	h

Por lo tanto, las combinaciones posibles de los valores de n y l desde $n = 1$ hasta $n = 4$ son:

valor de n	1	2	3		4					
valor de l	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
notación	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f

La notación de la tercera línea es la que se emplea comúnmente para la combinación particular de valores de n y l , el número corresponde al valor de n y la letra a la designación del valor de l .

Retomando el caso del átomo de la figura A.1.1 y suponiendo que el electrón expulsado corresponde a la capa 1s (capa K); si un electrón de la capa L ($n = 2$) brinca a la capa K, la radiación emitida se denomina línea K_{α} . De manera similar, si un electrón de la capa M ($n = 3$) brinca a la capa K, se emite una línea K_{β} . Como hay más de un nivel tanto en la capa L como en la capa M, habrá más de una línea K_{α} y más de una línea K_{β} obedeciendo siempre las reglas que definen las transiciones permitidas. Las líneas L se originan cuando electrones de las M, N, ... brinchan a la capa L. Las líneas M aparecen cuando caen electrones de los niveles N, O, ... en el nivel M. La figura A.1.2 muestra los niveles de energía adecuados para una emisión de rayos X.

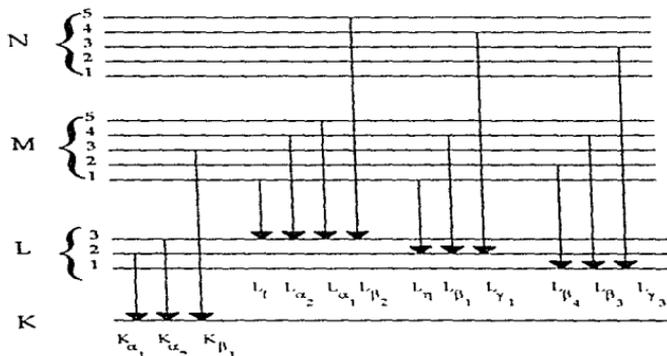


Figura A.1.2

Nomenclatura de los niveles de energía adecuados para una emisión de rayos X

Se define sección eficaz de producción de rayos X por inducción de partículas a la probabilidad de producir los fotones de rayos X de una línea en particular. Es una magnitud física que depende del proyectil, su energía de incidencia y el átomo en particular. Para las líneas K se relaciona con la probabilidad de ionizar el átomo, o *sección eficaz de ionización*, a través de la ecuación:

$$\sigma_{xi} = \sigma_{I,K} \omega_K P_i \quad , \quad (A.1.1)$$

donde:

σ_{xi} = Sección eficaz de producción de rayos X

$\sigma_{I,K}$ = Sección eficaz de ionización

ω_K = Producción de fluorescencia, o fluorescencia

P_i = Intensidad relativa de todas las posibles transiciones que producen radiación en la línea i

Así mismo:

$$\omega_K = \frac{\text{Número total de fotones X emitidos}}{\text{Número total de vacantes en la capa K}} \quad (A.1.2)$$

Para la producción de rayos X de las capas L, es necesario tomar en cuenta las transiciones no radiativas entre las subcapas L₁, L₂ y L₃, llamadas transiciones Coster-Kronig. Estas transiciones dificultan la obtención de la expresión de σ_{x,L_i} , ya que será necesario conocer las secciones de ionización y las fluorescencias para cada subcapa¹. A pesar de la complicación antes mencionada, es posible definir una fluorescencia promedio de la capa L, ω_L y la intensidad relativa de la radiación emitida en el subnivel i, de este modo se obtiene una ecuación análoga a la obtenida para la capa K:

$$\sigma_{x,L_i} = \sigma_{I,L} \omega_L P_i \quad (A.1.3)$$

¹ La sección eficaz de producción de las líneas L más comunes pueden consultarse en las referencias (Miranda J., En prensa (c)), (López S. A., 1996), (Crespo S. A., 1991).

La sección eficaz de ionización no es una magnitud fácil de obtener, por lo que se han desarrollado varios modelos teóricos para calcularla².

A.2 ANALISIS CUANTITATIVO CON PIXE

Es importante señalar que el análisis cuantitativo de una muestra depende en gran medida del tipo de blanco utilizado, que puede ser delgado, intermedio y grueso. La importancia del espesor del blanco estriba en la pérdida de energía de los iones en él, así como de la atenuación que los fotones de rayos X pueden sufrir.

En el caso de el análisis de aerosoles atmosféricos, se maneja una capa de partículas que varía de 100 µg/cm² a unos cuantos mg/cm² dependiendo del tamaño de las partículas. Estos valores implican que, aún para la fracción gruesa, la corrección por la atenuación de los rayos X así como de la pérdida de energía de los iones, es tan pequeña que no origina errores significativos. Se puede considerar despreciable la pérdida de energía de los proyectiles (iones) cuando ésta no implica más del 3% del total de la energía del haz. De este modo, ignorando los efectos antes mencionados, se obtiene:

$$Y(Z) = \frac{N_{av} \cdot \sigma_Z(E_0) \cdot \omega_Z b_Z \epsilon_Z M_\alpha N}{S \cdot A_Z} \quad (A.2.1)$$

en la que:

S = sección transversal del haz, con distribución de carga uniforme

N_{av} = número de Avogadro

$\sigma_Z(E_0)$ = sección eficaz de ionización de la energía de incidencia de los proyectiles E_0

ω_Z = producción de fluorescencia de los rayos X (K ó L)

b_Z = fracción de rayos X (K ó L) totales que aparecen como K_α o L_α

ϵ_Z = eficiencia absoluta del sistema de detección

M_α = densidad superficial del elemento

N = número de proyectiles que incidieron sobre la muestra

A_Z = masa atómica del elemento

Es conveniente, para facilitar el análisis, definir la sensibilidad para blanco delgado; $k(Z)$:

² Los modelos teóricos se describen en (Miranda J. En prensa. (c)).

$$k(Z) = \frac{\sigma_Z(E_0) \cdot \omega_Z b_Z c_Z N_{av}}{A_Z}; \quad (\text{A.2.2})$$

por lo tanto, la ecuación (A.2.1) puede expresarse como:

$$M = M_a S Y_Z = k(Z) N M_a, \quad (\text{A.2.3})$$

la masa absoluta del elemento analizado, M , se puede determinar mediante:

$$M = M_a S. \quad (\text{A.2.4})$$

A.3 SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA LA TECNICA PIXE

En el caso de blanco delgado se utiliza el dispositivo experimental presentado en la figura (2.6). El haz de partículas de Energía E_0 bombardea la muestra con un ángulo incidente θ_i con respecto a la normal de la superficie de la muestra, en tanto que la radiación liberada forma un ángulo θ_s .

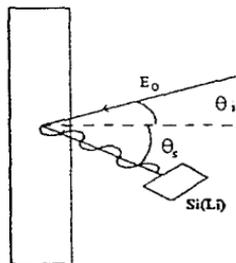


Figura A.3.1
Representación esquemática del sistema experimental

A.4 PROGRAMA DE COMPUTO AXIL

La información analítica de las concentraciones de distintos elementos es obtenida en un espectro complejo que contiene picos característicos de Rayos X (ver figura 2.8). Es posible efectuar un análisis cualitativo asignando números atómicos a cada pico o grupo de picos, mientras que el análisis cuantitativo puede realizarse mediante las ecuaciones de blanco delgado, enunciadas anteriormente; sin embargo, los espectros de PIXE presentan una radiación de fondo a la que se superponen las líneas de rayos X características emitidas por la muestra. Las causas de la radiación de fondo son diversas³ y complican en gran medida el análisis de los espectros.

Tomando en consideración tales complicaciones, se han desarrollado programas de cómputo que tiene como objetivo ajustar el fondo y las líneas, que se aproximan a gaussianas.

A.5 SUPERPOSICION DE LINEAS DE EMISION

La superposición de las líneas se debe al límite de resolución del detector así como a la gran cantidad de picos de rayos X que se pueden detectar mediante esta técnica⁴. En los aerosoles atmosféricos se presentó superposición entre las líneas K_{β} del potasio y K_{α} del calcio; del mismo modo entre los picos de las líneas K_{α} del vanadio y K_{β} del titanio.

Es posible resolver este problema calculando un factor de corrección que involucre el número de rayos X detectados para las líneas K_{α} y K_{β} del titanio y potasio; así:

$$N_{Ti}^P = \frac{Ti K_{\beta}}{Ti K_{\alpha}} \quad (A.4.1)$$

$$N_K^P = \frac{K K_{\beta}}{K K_{\alpha}} \quad (A.4.2)$$

en las que:

³ Para una información más detallada respecto a la radiación de fondo consultar la referencia (Miranda J., En prensa (c)).

⁴ En (López S. A., 1996) se presenta una tabla con los elementos en los que se da la superposición.

N_{Ti}^p, N_K^p = factor de corrección por superposición de líneas

Z_{K_a}, Z_{K_β} = número de cuentas para la línea K_a y K_β , respectivamente, obtenidas mediante el patrón Z

$Z = Ti$ y K .

Para la muestra se tendrá entonces que:

$$Ti_{K_\beta}^m = N_{Ti}^p Ti_{K_a}^m \quad (A.4.3)$$

$$K_{K_\beta}^m = N_K^p K_{K_a}^m \quad (A.4.4)$$

Si la cantidad de líneas de rayos X obtenidas para el calcio y el vanadio corresponden a la superposición con las líneas K_β del elemento anterior, entonces el número de líneas de rayos X emitidas realmente por esos elementos se define como:

$$Ca_{K_a}^m = Ca^s - K_{K_\beta}^m \quad (A.4.5)$$

y

$$V_{K_a}^m = V^s - Ti_{K_\beta}^m \quad (A.4.6)$$

en las que:

Ca^s, V^s = número de cuentas de calcio y vanadio, respectivamente, obtenidas del espectro.

B. ACELERADOR DE VAN DE GRAAFF

El acelerador de partículas surge como una necesidad de generar partículas energéticas empleadas en la investigación de la Física Nuclear.

El funcionamiento de un acelerador de Van de Graaff consiste básicamente en tres etapas:

1. Generación de un alto voltaje de corriente directa;
2. Producción y aceleración de un haz de iones positivos;
3. Medición y regulación de la energía del haz.

Siguiendo la secuencia de estas etapas, el acelerador de Van de Graaff inicia su funcionamiento en el momento en que se carga positivamente una campana de un material conductor; para este fin se emplea una banda de material aislante que en un de sus extremos está conectada mediante un peine colector a una fuente de alto voltaje y del otro, mediante otro peine a la campana terminal, con ayuda de un par de poleas se mueve la banda de tal modo que la carga colectada en la fuente de alto voltaje se deposita en el extremo de la terminal. El aumento de carga en la terminal provoca un potencial que se mantiene en equilibrio cuando la carga depositada es igual a la que se pierde por el haz, por las resistencias y por las puntas de corona (puntos de liberación de carga en caso de un exceso de ella en la terminal). Es posible que se generen chispas, sin embargo el uso de un gas dieléctrico (SF_6) evita que esto suceda.

El gas por ionizar (en el caso actual fue hidrógeno) se introduce a la fuente de iones, que consiste en una ampolla de vidrio, es aquí donde se ioniza el gas por medio de una señal de radiofrecuencia. Así se genera un plasma que se extrae con ayuda de campos eléctricos y magnéticos; posteriormente, los iones positivos se aceleran debido a la diferencia de potencial y se enfocan dentro del tubo del acelerador. V es la diferencia de potencial, la energía del haz será entonces qV , donde q es la carga del ion

Debido a que el potencial es de corriente directa, las partículas del haz son homogéneas en cuanto a su energía. Para cambiar la corriente del haz, se debe regular el flujo de gas a la fuente así como su potencial. Durante todo el trayecto, es importante que la partículas no se encuentren con otras moléculas en su camino, por lo que desde la fuente de iones hasta la cámara se debe mantener una presión de alto vacío, que se obtiene con bombas difusoras y turbomoleculares apoyadas por bombas mecánicas y con trampas de nitrógeno

líquido a lo largo de toda la línea. Al final de la línea se localiza la cámara de análisis, retomando la figura 2.6, se observa que la cámara de análisis esta constituida por:

- Sistema de vacío;
- Detector;
- Caja de Faraday;
- Preamplificador;
- Amplificador;
- Analizador multicanal.

B.1 SISTEMA DE VACIO

Para evitar las colisiones entre las partículas generadas y las moléculas que pudieran existir dentro del acelerador se reduce la densidad del gas extrayéndolo de la región por donde transitará el haz. Para este fin se emplean las bombas de vacío que de acuerdo a los principios físicos de su funcionamiento se clasifican en: mecánicas, de vapor, iónicas, de adsorción, criogénicas, por gettering; (*Miranda J.. En prensa (c)*). Las bombas usadas en el acelerador de Van de Graaff son la rotatoria, de difusión y turbomolecular.

B.2 DETECTORES DE RADIACION

La técnica PIXE requiere, al igual que cualquier otra técnica nuclear, de un detector que sea sensible a cada una de las clase de radiación que se empleen.

Al recibir la radiación, el detector interactúa con ella al ionizarse alguno de sus componentes o bien, al liberar carga eléctrica

Si se considera al detector como una caja negra que recibe radiación ionizante, al incidir dicha radiación el detector produce una carga "libre". Esta carga lleva la información de la partícula incidente y por tanto es necesario colectarla.

Ahora bien, en realidad no sólo es un el cuanto de radiación incidente, por lo que se generarán entonces una serie de pulsos de carga.

En un caso ideal, cada cuanto de radiación emitido por la fuente debería ser procesado por el detector; pero debido a ciertas limitaciones, las señales emitidas por el detector no corresponden a toda la radiación incidente o producida por la fuente.

Por esta razón, se ha definido la eficiencia como:

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{Número de pulsos registrados}}{\text{Número de pulsos emitidos por la fuente}} \quad (\text{B.1.1})$$

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{Número de pulsos registrados}}{\text{Número de pulsos incidentes en el detector}} \quad (\text{B.1.2})$$

La eficiencia del detector, aunque es constante para una energía determinada del proyectil, depende de la energía del fotón de Rayos X como se muestra en las siguientes figuras:

Las gráficas antes presentadas se refieren a un detector de Si(Li), empleado en la técnica PIXE. Este detector posee la particularidad de ser un semiconductor que en un extremo posee una impureza donadora de electrones en tanto que el otro extremo está constituido de un material aceptor. Este tipo de detectores debe mantenerse en enfriamiento continuo a temperatura de nitrógeno líquido, por lo que deberán encapsularse al vacío.

La eficiencia del detector de Si(Li) depende principalmente de la atenuación de los fotones en las ventanas de entrada del detector (situación de gran importancia para los rayos X de baja energía) y del espesor de la pastilla.

B.3 PREAMPLIFICADOR

Es el primer circuito asociado al detector y su función es aumentar la amplitud del pulso de voltaje del detector hasta un tamaño procesable por el amplificador.

B.4 AMPLIFICADOR

Este dispositivo toma la señal del preamplificador, dándole cierta forma y aumentándola hasta un tamaño comprendido en el intervalo de 0 V a 10 V y que corresponden al intervalo dinámico del resto de los aparatos para análisis.

B.5 ANALIZADOR MULTICANAL

Recibe señales de diferentes amplitudes provenientes del amplificador, las clasifica según amplitud y acumula el número de pulsos de una cierta altura. De este modo registra el espectro de energía de la radiación incidente.

BIBLIOGRAFIA

- Air Conservation Comission, Report. *Air Conservation*. 1968. (American Association for the Advancement of Science. U.S.A.).
- Air Quality Group, Croker Nuclear laboratorv. *SFII Manual*. 1987. (University of California, Davis.).
- Aldape F., Flores M. J., Diaz R. V., Morales J. R., Cahill T. A. y Saravia L.. (1991a). *International Journal of PIXE*, 1 (4), 355-371.
- Aldape F., Flores M. J., Diaz R. V., Miranda J., Cahill T. A. y Morales J. R.. (1991b). *International Journal of PIXE*, 1 (4), 373-388.
- Alvarez M. R. (1983). *Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 6, 139-144.
- Andrade F. y Orsini C.. (1994). *Atmospheric Environment*, 28 (14), 2307-2315.
- Cahill T. A.. (1990). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* B49, 345-350.
- Castellan G.. *Fisicoquímica*. 1987. (Addison Wesley Iberoamericana. U.S.A.).
- Comisión Nacional de Ecología. *Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. (CONADE. México. 1991).
- Crespo S. A. *Tesis licenciatura en Física. Estudio de películas de NdF₃ por haces iónicos*. (Facultad de Ciencias. México. 1991).
- Crespo S. I. *Tesis licenciatura en Ingeniería Química. Modelo de Receptor para aerosoles atmosféricos en el suroeste de la Ciudad de México*. (Facultad de Química. México. 1996).
- Fuentes G. V. (1991). *Revista Ciencia*, 22, 45-49.

- Galindo I.. (1990). *Revista Ciencia*, **41**, 163-175.
- Jáuregui E.. (1988). *Cuadernos de Extensión Académica*, **45**, 155-168.
- Johansson S. A., y Campbell J. L.. *PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis*. (John Wiley and Sons. Chichester. 1988).
- Koltay, E., Gómez Ferreira, J., Ramos, M.T.. *X-Ray Spectrometry in Atomic and Solid State Physics*. Series B: Physics **187** (N.Y., U.S.A. 1988), p.p. 301-334.
- López S., A. *Tesis licenciatura en Física. Análisis de aerosoles atmosféricos en el suroeste de la Ciudad de México utilizando técnicas de origen nuclear*. (Facultad de Ciencias. México. 1996).
- Miranda J., Morales J. R., Cahill T. A., Aldape F. y Flores M. J.. (1991b). *International Journal of PIXE* **1** (4), 373-388.
- Miranda J., Zironi E., y Michaelian K., eds. (1993). *Notas del Primer Curso Regional sobre aceleradores de Partículas*. IFUNAM. México.
- Miranda J.. En prensa (a). *Studies of Atmospheric aerosols in large urban areas using PIXE: an overview*.
- Miranda J., Andrade E., López-Suárez A. y Ledesma R.. En prensa (b).
- Miranda J.. En prensa (c). *Notas*.
- Nava T. M. D.. *Tesis licenciatura en Ingeniería Química. Determinación de Partículas suspendidas Totales y su contenido de C, Pb, Cu, y Cd como evaluación de la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. (Facultad de Química. 1991).
- Painter, D.A. *Air Pollution Technology*. 1974. (Prentice Hall Company. U.S.A.).

- Próspero J. M., Charlson R. J., Mohnen V., Jacnicke R., Delany A. C., Moyers J., Zoller W. y Rahn K. (1983). *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **21**, 1607-1629.
- Spedding, D.J. *Environmental Toxicants Human Exposures and their health effects*. 1991 (Reverté España)
- Statsoft Inc., U S A (1991) *CSS. Statistica*
- Stern, A.C.. *The effects of Air Pollution, Vol. II*. (Academic Press Inc. U S A.1977).
- Taylor B. N. y Kuyatt Ch. E.. (1994) National Institute of Standards and Technology, U S A.. Technical Note 1297.
- Thurston G. D. y Spengler J. D. (1985) *Atmospheric Environment*. **19**, 9-25.
- Wayne, R., P *Chemistry of Atmospheres*. 1991 (Clarendon Press. U S A.).