

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



"ANALISIS DE FACTORES APLICADO A DATOS DE  
COMPOSICION ELEMENTAL DE MATERIA  
PARTICULADA SUSPENDIDA EN LA ZONA NOROESTE  
DE LA CIUDAD DE MONTERREY"

POR  
JUANA MARIA MONTOYA ZAMORA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN INGENIERIA CERAMICA

AGOSTO, 1999

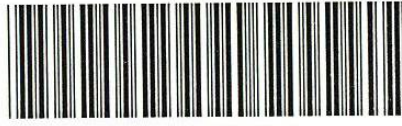
TM

Z5521

FCQ

1999

M66



1020126720

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



“ANÁLISIS DE FACTORES APLICADO A DATOS DE  
COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE MATERIA PARTICULADA  
SUSPENDIDA EN LA ZONA NOROESTE DE LA CIUDAD DE  
MONTERREY”

POR

JUANA MARÍA MONTOYA ZAMORA

Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA  
EN CIENCIAS con especialidad en Ingeniería Cerámica.

AGOSTO DE 1999

TM  
75  
E

0' -



FONDO  
TESIS

---

**“ANÁLISIS DE FACTORES APLICADO A DATOS DE COMPOSICIÓN  
ELEMENTAL DE MATERIA PARTICULADA SUSPENDIDA EN LA ZONA  
NOROESTE DE LA CIUDAD DE MONTERREY”**

**Aprobación de la Tesis :**

---

**M. en C. Francisca Aldape Ugalde  
(Asesor y director de tesis)**

---

**Dr. Antonio Fernández Fuentes  
(Co-asesor)**

---

**Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa  
Revisor y Sinodal**

---

**M.C. Perla Elizondo de Cota  
Revisor y Sinodal**

---

**M.C. Martha A. Suárez Herrera  
Coordinadora de la Escuela de Graduados  
en Ciencias**

---

*Dedicado especialmente a:*

*Eligio Montoya Molina*

*A Papá...para siempre*

*Adoro tu sonrisa, tu risa,  
tu apego a la vida,  
Respeto tu sabiduría, aunque  
en mi inexperta juventud  
muchas veces dudé de ella.  
Admiro tu fortaleza,  
tu valor,  
y espero haber heredado  
una pequeña parte de ellos.  
Por todo lo que me has dado,  
por todo lo que me has enseñado,  
en momentos de dolor  
y en momentos de alegría,  
sería imposible quererte más de lo  
que te quiero;  
y sin embargo, cada vez que hablamos,  
que estamos juntos,  
sé que nunca  
te he querido tanto como entonces  
y que hoy te quiero aún más que antes...  
para siempre, Papá...*

- Coleen Robinson

*Con cariño:*

*A quienes amo*

*Y son mi mejor apoyo en los momentos difíciles y mi mejor  
motivación para continuar superándome día a día*

*A mi madre: María Clara*

*A mi hermano: José Claro*

*A mi novio: Sergio*



---

## Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente al Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa ( asesor extraoficial), por su valiosa intervención en la realización de éste trabajo, por los conocimientos aportados a la parte estadística del mismo y las interesantes discusiones que ayudaron a enriquecerlo. Sin su ayuda hubiese sido muy difícil llevar a buen término este proyecto.

---

---

## *Agradecimientos*

A Dios por el más maravilloso regalo: *la vida*

A mi padre Eligio, mi madre María Clara y mi hermano José por brindarme un apoyo incondicional y ser mi principal motivo de superación.

A mi novio Sergio, quien se ha convertido en un gran apoyo para mi, quien me aconseja y alienta a continuar superándome.

A mi familia: tíos, tías y primos por tantos momentos de alegría compartidos.

A CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por el apoyo brindado a través del programa nacional de becas de postgrado.

Al ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A la M. en C. Francisca Aldape Ugalde por la asesoría brindada, por los conocimientos transmitidos, por los consejos, por los regaños y por las discusiones que enriquecieron este trabajo.

Al Dr. Antonio Fernández Fuentes y a la Dra. Leticia M. Torres Guerra por este tema de tesis y la invitación a participar en este proyecto.

A SIREYES y PAICYT por el apoyo financiero que permitió llevar a cabo este trabajo.

A mis compañeros de maestría: Bertha, Elvira, Vero, Alejandra, Claudia, Conrado y Alfredo por hacer más agradable el camino recorrido para llegar a este momento.

A Sagrario e Isaías por su bella amistad, por las horas de estudio y los gratos momentos compartidos.

---

---

A todos en CIDEMAC por su apoyo y compañerismo, especialmente al Dr. Luis Carlos por sus interesantes discusiones, a la M.C. Lorena, y Hugo por su amistad.

A todos los que me brindaron su apoyo y amistad durante mi estancia en el ININ.

Al grupo PIXE: Físico Javier, Raúl, Mario y Beatriz.

A todos los integrantes (cuerpo técnico, jugadores y porra), de láser por la maravillosa convivencia y por los buenos partidos de soccer.

A Faustina, Blanca, José Luis, David, Elsa, Dario, Lucy, Pablo, Joel, Elvis, Oswaldo, Jesús, Demetrio y a todos aquellos que hicieron mas agradable mi estancia en Toluca.

Quiero agradecer a los buenos maestros que a lo largo de mi preparación académica Dios sabiamente ha puesto en mi camino, en especial a la maestra Modesta Ramos Delgado.

---

---

## Índice General

	Pág.
Capítulo I	
Introducción	
1.1 Generalidades	2
1.2 Contaminación Atmosférica	3
1.3 Materia Particulada Aerotransportada (MPA)	6
1.4 Técnica de Caracterización	9
1.5 Antecedentes	11
Capítulo II	
Experimental	
2.1 Instrumentos, Equipos y Materiales	14
2.2 Colección	14
2.3 Irradiación de las Muestras	17
2.4 Análisis Cualitativo y Cuantitativo	18
2.4.1 Análisis Cualitativo (Curva de Energía contra Canal)	19
2.4.2 Análisis Cuantitativo (Curva de Sensitividad)	20
2.4.3 Límite de Detección Mínimo (LDM)	24
2.4.4 Evaluación del Espectro	25
Capítulo III	
Resultados	
3.1 Análisis Cualitativo y Cuantitativo	29
3.2 Tratamiento de los Datos	33
3.2.1 Diagramas de Variación Temporal	33
3.2.2 Cálculo de Factores de Enriquecimiento	35
3.2.3 Análisis de Factores	38

---

	Pág.
Capítulo IV	
Discusión de Resultados	
4.1 Partícula Fina ( $PM_{2.5}$ )	50
4.2 Partícula Gruesa ( $PM_{10}$ )	56
Capítulo V	
Conclusión	
5.1 Conclusiones	59
5.2 Recomendaciones	61
Capítulo VI	
Bibliografía	64

---

## Índice de Figuras

Figura		Pág.
1.1	Función de distribución de tamaño para un aerosol atmosférico urbano	7
1.2	Generación de los rayos-X característicos	10
2.1	Mapa de la ciudad de Monterrey que muestra el sitio de monitoreo y las principales avenidas	16
2.2	Diagrama del Análisis PIXE	17
2.3	Curva de energía contra canal	20
2.4	Curva de sensibilidad del sistema	23
2.5	Espectros típicos de rayos-X característicos obtenidos durante el análisis PIXE para partícula gruesa, $PM_{15}$ (a), para el filtro nuclepore (b), para partícula fina, $PM_{2.5}$ (c) y para el filtro teflon (d).	25
3.1	Variación temporal de Pb para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) y gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día	34
3.2	Variación temporal de V en partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día y la noche	34
3.3	Variación temporal de Fe para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) y gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día	35
3.4	Factores de enriquecimiento para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día y la noche	37
3.5	Factores de enriquecimiento para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día y la noche	38
3.6	Variación temporal de los puntajes de los factores F1, F2 y F3 para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día	47
3.7	Variación temporal de los puntajes de los factores F1, F2 y F3 para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante la noche	47

Figura		Pág.
3.8	Variación temporal de los puntajes de los factores F1 y F2 para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día	48
3.9	Variación temporal de los puntajes de los factores F1 y F2 para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante la noche	48

---

## Índice de Tablas

Tabla	Pág.
1.1 Registro de accidentes graves ocasionados por contaminación de aire	4
1.2 Composición del aire atmosférico seco	5
1.3 Velocidades de asentamiento	6
3.1 Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante el día	29
3.2 Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante la noche	30
3.3 Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula gruesa ( $\text{PM}_{15}$ ) durante el día	31
3.4 Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula gruesa ( $\text{PM}_{15}$ ) durante la noche	32
3.5 Factores de enriquecimiento referidos al Fe para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y gruesa ( $\text{PM}_{15}$ ) durante el día y la noche	37
3.6 Matriz de correlación obtenida para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante el día	42
3.7 Matriz de correlación obtenida para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante la noche	42
3.8 Matriz de correlación obtenida para partícula gruesa ( $\text{PM}_{15}$ ) durante el día	42
3.9 Matriz de correlación obtenida para partícula gruesa ( $\text{PM}_{15}$ ) durante la noche	43
3.10 Matriz de factores no rotada para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante el día	43
3.11 Matriz de factores no rotada para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante la noche	44



---

Tabla	Pág.
3.12 Matriz de factores no rotada para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día	44
3.13 Matriz de factores no rotada para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante la noche	44
3.14 Matriz de factores rotada (varimax) para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día	45
3.15 Matriz de factores rotada (varimax) para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante la noche	45
3.16 Matriz de factores rotada (varimax) para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día	46
3.17 Matriz de factores rotada (varimax) para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante la noche	46

R  
E  
S  
U  
M  
E  
N

## *Resumen*

El problema de la contaminación atmosférica representa uno de los más grandes retos para la comunidad científica debido a su complejidad y a la amplia variedad de contribuyentes a dicho problema.

Dentro de los contaminantes de la atmósfera, actualmente, la materia particulada ha recibido especial atención ya que por sus características representa un alto riesgo para la salud.

El presente trabajo es un estudio de materia particulada suspendida en la ciudad de Monterrey. Fue realizado durante el invierno de 1996 y 1997, las muestras colectadas fueron analizadas mediante la técnica de Emisión de Rayos-X Inducida por Partícula (Particle Induced X-Ray Emission: PIXE)

Trece elementos fueron detectados (S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb). El análisis de los resultados y el tratamiento estadístico permitió clasificar a estos elementos, según su origen, en antropogénicos y naturales, además de sugerir las posibles fuentes de emisión de los mismos.

Capítulo I

—  
Z  
—  
O  
—  
U  
—  
U  
—  
U  
—  
U  
—  
D  
—  
O  
—  
R  
—  
H  
—  
Z  
—

## 1.1 Generalidades

El creciente desarrollo urbano e industrial ha dado origen a numerosos problemas socioeconómicos que se agravan día a día debido a la escasez de información y a la falta de apoyo a investigaciones formales que profundicen en el estudio de dichos problemas. Ejemplo de esto es el estudio de la contaminación atmosférica que es uno de los problemas más complejos y de mayor impacto ambiental a nivel mundial.

Actualmente, en diversas ciudades de nuestro país y del resto del mundo, el problema de la contaminación del aire ha creado preocupación entre ciudadanos, autoridades y científicos, despertando en ellos el interés por profundizar en el conocimiento de sus causas, tendencias y efectos sobre la salud.

Dentro del grupo de contaminantes que en Monterrey están siendo monitoreados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), se encuentran CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub>. De estos contaminantes es importante notar que es la materia particulada aerotransportada (MPA), de la que menos información se dispone respecto a su naturaleza, es decir sobre los elementos que la componen, las concentraciones elementales en que éstos están presentes, su comportamiento temporal, así como su influencia en la salud humana y en los ecosistemas.

Como ya se ha dicho, la información es escasa, aún cuando se conoce que las partículas suspendidas y específicamente aquellas de tamaño menor a  $2.5 \mu\text{m}$  son consideradas entre las más peligrosas para la salud humana. Por ejemplo, los tiempos de residencia de estas partículas en la atmósfera son grandes lo que aumenta la posibilidad de que al ser respiradas, por su tamaño, lleguen a los pulmones e incluso a los sacos alveolares pudiendo incorporarse fácilmente al torrente sanguíneo.

La degradación de la calidad del aire y la escasa información sobre los contaminantes del mismo, en particular aquella que se refiere a la MPA, así como los riesgos a la salud y en general, el impacto ambiental que las partículas originan son las razones que motivaron la realización de este trabajo.

## *1.2 Contaminación Atmosférica*

La contaminación del aire no es un fenómeno reciente, es consecuencia del desarrollo tecnológico y de la vida moderna. Desde el año de 1272 se tienen antecedentes de este problema, cuyos intentos por solucionarlo se inician con la prohibición en Inglaterra del uso del “carbón marítimo”, responsable de la capa de humo que cubría el cielo de la ciudad de Londres<sup>1</sup>. Con este suceso se inició el interés en la erradicación de un problema cuyas graves consecuencias se

manifestaron algunos siglos después en un accidente que cobró miles de vidas.

La tabla 1.1 muestra un registro de casos graves de contaminación del aire<sup>2</sup>. En los períodos en que éstos se presentaron, se observó la presencia de una neblina espesa por varios días. Estos acontecimientos mostraron claramente el efecto que la contaminación del aire produce en la salud de los seres humanos.

*Tabla 1.1. Registro de accidentes graves ocasionados por contaminación del aire.*

Año	Lugar	Consecuencias
1873	Londres	Incremento en el índice de mortalidad por bronquitis
1930	Bélgica	Incremento en el número de personas enfermas Incremento en la tasa de mortalidad
1931	Inglaterra	Incremento en la tasa de mortalidad
1948	Pennsylvania	Incremento en el número de personas enfermas Incremento en la tasa de mortalidad
1952	Londres	Incremento en la tasa de mortalidad

El concepto de contaminación del aire puede ser definido como la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, en cantidades y duración tales que perjudiquen la salud o el bienestar de todo organismo vivo y de los ecosistemas en general.

Para definir una sustancia como contaminante del aire es necesario conocer la composición del aire atmosférico seco (ver Tabla<sup>3</sup> 1.2), por lo tanto, cualquier sustancia presente en la atmósfera

que no sea un constituyente del aire o aquella que siendo un constituyente de éste, rebase la concentración establecida dada en la tabla 1.2 y que afecte al medio ambiente, será considerada como contaminante.

Tabla 1.2. Composición del aire atmosférico seco.

Sustancia	%V	Conc. [ppm]
Nitrógeno	78.084	780,900
Oxígeno	20.946	209,400
Argón	0.934	9,300
Dióxido de Carbono	0.33	315
Neón		18
Helio		5.2
Metano		1.2
Kriptón		0.5
Hidrógeno		0.5
Xenón		0.08
Dióxido de Nitrógeno		0.02
Ozono		0.01-0.04

Una clasificación general de los contaminantes del aire es la siguiente<sup>2</sup>:

1. Materia particulada o partículas.
2. Compuestos de azufre.
3. Compuestos orgánicos.
4. Compuestos nitrogenados.
5. Monóxido de carbono.
6. Compuestos halogenados.
7. Compuestos radioactivos.
8. Compuestos naturales



### 1.3 Materia Particulada Aerotransportada (MPA)

Este trabajo se refiere al estudio de contaminación causada por materia particulada o partículas o lo que es lo mismo Materia Particulada Aerotransportada (MPA), en sus modos fino ( $PM_{2.5}$ ) y grueso ( $PM_{10}$ ) en la atmósfera de la zona noroeste de la ciudad de Monterrey, N.L.

La MPA se presenta en un amplio intervalo de tamaños ( $0.002 - 500 \mu\text{m}$ )<sup>2</sup>. Los estudios sobre contaminación por partículas se han centrado en aquellas fracciones de tamaño que se encuentran suspendidas en la atmósfera durante períodos de tiempo relativamente grandes (partículas  $< 20 \mu\text{m}$ ). Dicho tiempo se conoce como tiempo de residencia y dependerá de las velocidades de asentamiento de las partículas de acuerdo con su tamaño, estas velocidades se reportan en la tabla<sup>2</sup> 1.3 para una densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$ .

Tabla 1.3 Velocidades de asentamiento

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad de asentamiento (cm/s)
0.1	$4 \times 10^{-5}$
1	$4 \times 10^{-3}$
10	0.3
100	30

Las partículas menores a  $10 \mu\text{m}$  son las que presentan mayores tiempos de residencia, como se deduce de la tabla 1.3. Estas partículas se clasifican dentro de lo que se conoce como aerosol atmosférico que

se define como una mezcla de partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en un medio gaseoso (aire)<sup>4</sup>. Estas partículas cuando constituyen un aerosol urbano<sup>4,5</sup> se distribuyen agrupadamente de acuerdo con su tamaño, la figura 1.1 muestra una función trimodal de distribución de este tipo de aerosoles.

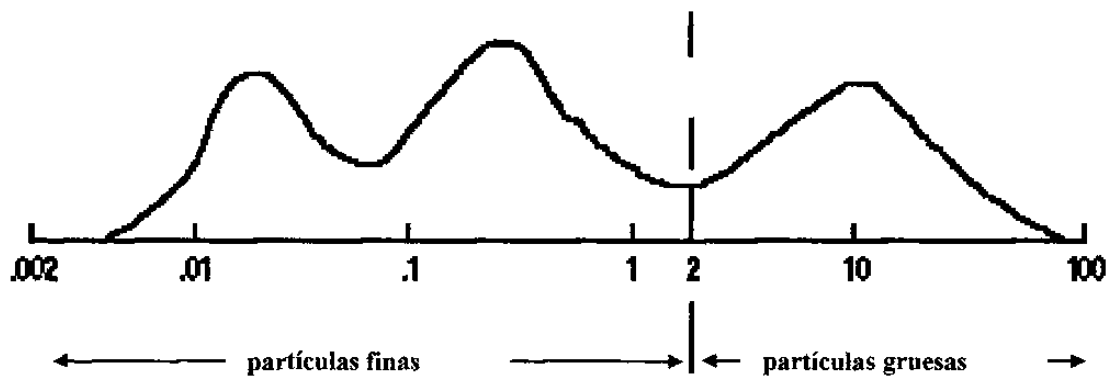


Figura 1.1. Función de distribución de tamaño para un aerosol atmosférico urbano.

De acuerdo a su tamaño la MPA se divide principalmente en dos grupos: (i) MPA en modo fino o materia particulada de diámetro menor de  $2.5\mu\text{m}$  y (ii) MPA en modo grueso o materia particulada de diámetro entre  $2.5$  y  $10\mu\text{m}$ <sup>4-9</sup>.

El modo fino tiene su origen en los procesos de combustión (vehicular, industrial, doméstica), y en las transformaciones de gas a partícula debidas a reacciones químicas ocurridas en la atmósfera<sup>2,4,5,7,10</sup>. La MPA en modo fino proviene principalmente de las actividades antropogénicas. El modo grueso tiene su origen, en gran

parte, en los polvos provenientes de la erosión natural, también contribuyen los procesos industriales como trituración y molienda, el polen, el tránsito vehicular y otros<sup>2,4,5,7,10</sup>. En general se podría decir que el modo grueso proviene mayoritariamente del material de la corteza terrestre.

Una de las razones principales para estudiar la MPA es aquella relacionada con sus efectos sobre la salud. En muchas de las ciudades de la república en las que se tiene este tipo de contaminación, los efectos producidos en la salud de los habitantes son principalmente la irritación de ojos y garganta y la reducción de la visibilidad. Sin embargo las repercusiones más graves en la salud se presentarán a mediano y largo plazo. Es importante enfatizar aquí, que los efectos a la salud y los problemas debidos a la contaminación por partículas, derivan de las propiedades que éstas presentan (diámetro aerodinámico, área superficial, forma, densidad, propiedades de movimiento, y propiedades ópticas), así como también de su composición química. Un ejemplo de estos efectos es aquel relacionado con el tamaño de las partículas ya que la profundidad hasta la que ellas penetran en los pulmones al ser aspiradas, depende de ese tamaño o lo que es lo mismo del diámetro aerodinámico ( $d_p$ ). De aquí se deduce que los problemas en vías respiratorias son debidos a aquellas partículas con menor tamaño (menores a  $2.5 \mu\text{m}$ ).

### 1.4 Técnica de Caracterización

En el análisis de muestras de contaminación atmosférica debida a MPA se presentan diversos problemas que dificultan el proceso de caracterización.

Dichos problemas son debidos a las cantidades tan pequeñas de muestra colectada para cada fracción de tamaño ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ), las cuales contienen una gran diversidad de elementos presentes en diferentes niveles de concentración ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )<sup>11</sup>. Todo esto hace necesario el empleo de técnicas de vanguardia más sensitivas que las tradicionales que permitan realizar análisis rápidos y multielementales.

Dentro de la caracterización de contaminantes atmosféricos se han empleado diversas técnicas de análisis, sin embargo, las técnicas de origen nuclear y otras de esta misma naturaleza como son el Análisis por Activación Neutrónica (AAN), la técnica de Fluorescencia de Rayos-X basada en la Dispersión de la Energía (FX-DE) y la de Emisión de Rayos-X Inducida por Partícula (PIXE), etc. son consideradas las más adecuadas y de hecho únicas<sup>4</sup> para realizar análisis multielementales no destructivos de partículas suspendidas en el aire y que han sido colectadas en filtros de alta pureza. Otras técnicas analíticas que han sido empleadas presentan el inconveniente de requerir de un proceso prolongado de disolución del polvo atmosférico que contienen los filtros, el cual es difícil de realizar debido a que como producto de la combustión, éste tiene la característica de ser vítreo y por lo tanto

difícil de disolver. Por otro lado, en general, las técnicas tradicionales como la Espectroscopia de Absorción Atómica solo pueden aplicarse a un elemento o a un pequeño grupo de ellos. Otras toman demasiado tiempo para realizar el análisis y muchas de ellas no son multielementales.

En el presente trabajo la técnica de caracterización empleada fue la técnica PIXE la cual esta basada en la generación del espectro de rayos-X característico de los elementos presentes en la muestra por medio de la excitación de los átomos de ésta mediante una partícula elemental (protón).

La emisión de rayos-X es promovida haciendo incidir un haz de protones sobre el blanco, el cual interacciona con un electrón de la capa más interna, expulsándolo y generando una vacancia que será inmediatamente ocupada por un electrón de un nivel superior, produciéndose la emisión de los Rayos-X característicos Figura 1.2 <sup>11-14</sup>.

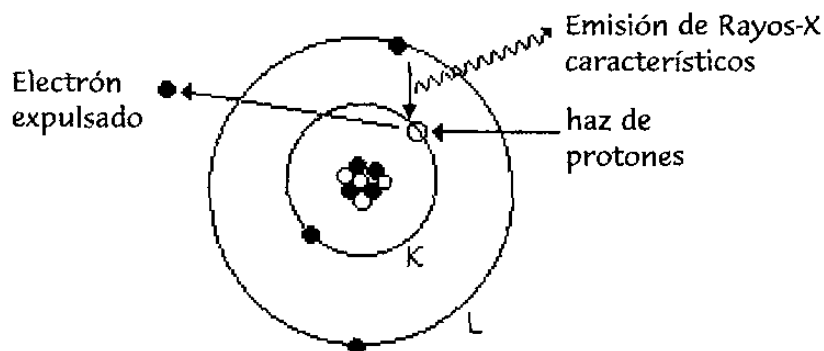


Figura 1.2. Generación de los rayos-X característicos

### 1.5 Antecedentes

Debido a la importancia que los efectos producidos por las partículas suspendidas pueden tener sobre la salud del ser humano es necesario controlar la cantidad de sólidos en suspensión en el aire sobre zonas urbanas así como llevar a cabo su caracterización.

Recientemente la EPA (Environmental Protection Agency), ha apoyado numerosas investigaciones dentro del estudio de la asociación de los efectos a la salud con la materia particulada<sup>15</sup> y ha establecido valores límites permisibles (estándares de la calidad del aire) para este tipo de contaminante atmosférico con lo que se pretende disminuir el número de muertes prematuras, los problemas pulmonares en los niños, etc<sup>16</sup>. Dentro de estas investigaciones, se ha dado importancia al estudio de las partículas PM<sub>2.5</sub>, y especialmente a la caracterización de este tipo de partículas, ya que evidentemente cada contaminante presente en estos tamaños de partícula afecta en distintas formas a la salud, como ya se ha comentado en párrafos anteriores, así como también al medio ambiente.

En México, actualmente, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) cuenta con una técnica cuantitativa de origen atómico que permite la caracterización de partículas contaminantes suspendidas en la atmósfera. Se han realizado numerosas investigaciones<sup>17-22</sup> que van desde identificar elementos contaminantes (metales y otros) dispersos en la atmósfera, cuantificar la

concentración de los mismos, medir éstos dentro de la fracción respirable ( $PM_{2.5}$ ) hasta estudiar su comportamiento de acuerdo con su tamaño, lo que ha permitido contribuir con un nuevo conocimiento más amplio y con bancos de datos que puedan ayudar, aportando valores confiables de concentraciones de los contaminantes.

En Monterrey, actualmente existe escasa información sobre los contaminantes en la atmósfera. Muy recientemente (1992) el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), comenzó a registrar cada hora las cantidades de  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$  y  $PM_{10}$  presentes en la atmósfera urbana así como algunos parámetros meteorológicos. Este sistema ha permitido conocer, que en un 15% de los días del año, la concentración de  $PM_{10}$  está por encima de la sugerida por la normativa vigente siendo además el contaminante, de aquellos monitoreados, que con más frecuencia rebasa la norma<sup>23</sup>.

Por lo anterior es imprescindible pues contar con información sobre el tipo de partículas, su concentración y comportamiento para contribuir en la toma de decisiones en cuanto a política ambiental se refiere.

E  
X  
P  
E  
R  
I  
M  
E  
N  
T  
A  
L

Capítulo II



## 2.1 Instrumentos, Equipos y Materiales

En el desarrollo del estudio se utilizaron los siguientes instrumentos, equipos y materiales:

- Colector Stacked Filter Unit (SFU)
- Acelerador de partículas Tandem Van de Graaff Modelo EN
- Cámara de Irradiación
- Detector de Silicio-Litio Modelo EG & ORTEC
- Analizador multicanal: preamplificador, amplificador y multicanal
- Filtros Nuclepore® diámetro de poro de 8  $\mu\text{m}$
- Filtros de Teflon® diámetro de poro de 3  $\mu\text{m}$
- $\text{CuS}_x$ , KCl, Ti, Mn, Cu, GaP, RbI,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ , Ag, Au, Pb estándares espectroscópicamente puros de densidad de área conocida, distribuidos por Micromatter®.

## 2.2 Colección

En el estudio de contaminación atmosférica la etapa de muestreo es una de las más importantes; la elección del colector, el soporte donde se colecta la muestra y la estrategia de muestreo dependen de los objetivos del estudio para los cuales éste fue diseñado. Adicionalmente se deben tener en cuenta los recursos disponibles para llevar a cabo el estudio<sup>12</sup>.

En el mercado existen diversos colectores de partículas, los cuales pueden coleccionar la materia particulada suspendida total o PST como los colectores de alto volumen (High Volume)<sup>24</sup>; o bien, coleccionar diferentes fracciones de tamaño como los colectores de impacto de cascada que pueden coleccionar hasta 8 fracciones de tamaño<sup>25</sup>, o los tipo dichotomous que coleccionan la materia particulada en sus modos fino ( $PM_{2.5}$ ) y grueso ( $PM_{15}$ ,  $PM_{10}$ ), como el SFU<sup>26</sup> y el Gent<sup>27</sup>.

El equipo de muestreo empleado en este estudio, fue una unidad de filtros apilados (Stacked Filter Unit: SFU) diseñado por el grupo de Calidad del Aire de la Universidad de California, Davis<sup>26</sup>. Dicho colector, como anteriormente se expuso, separa las partículas en dos fracciones de tamaño: i) masa fina ( $PM_{2.5}$ ), la cual fue coleccionada sobre un filtro de teflon de 3  $\mu m$  de diámetro de poro, ii) masa gruesa ( $PM_{15}$ ), coleccionada sobre un filtro de Nuclepore de 8  $\mu m$  de diámetro de poro. El colector operó a un flujo promedio de 9.5 l/min equivalente a 10.2 l/min para una altitud de 537 m.s.n.m.

La colección de las muestras se realizó de lunes a viernes durante 5 semanas entre el 9 de diciembre de 1996 y el 14 de enero de 1997. Se tomaron dos muestras por día de 6:00 - 18:00 hrs y de 18:00 - 6:00 hrs. El sitio de colección esta ubicado al noroeste de la ciudad de Monterrey, en la estación San Bernabé del SIMA (figura 2.1). El muestreo se realizó en este lugar debido a que es la estación de ésta institución en la que se han presentado los niveles de contaminación mas altos para  $PM_{10}$ .

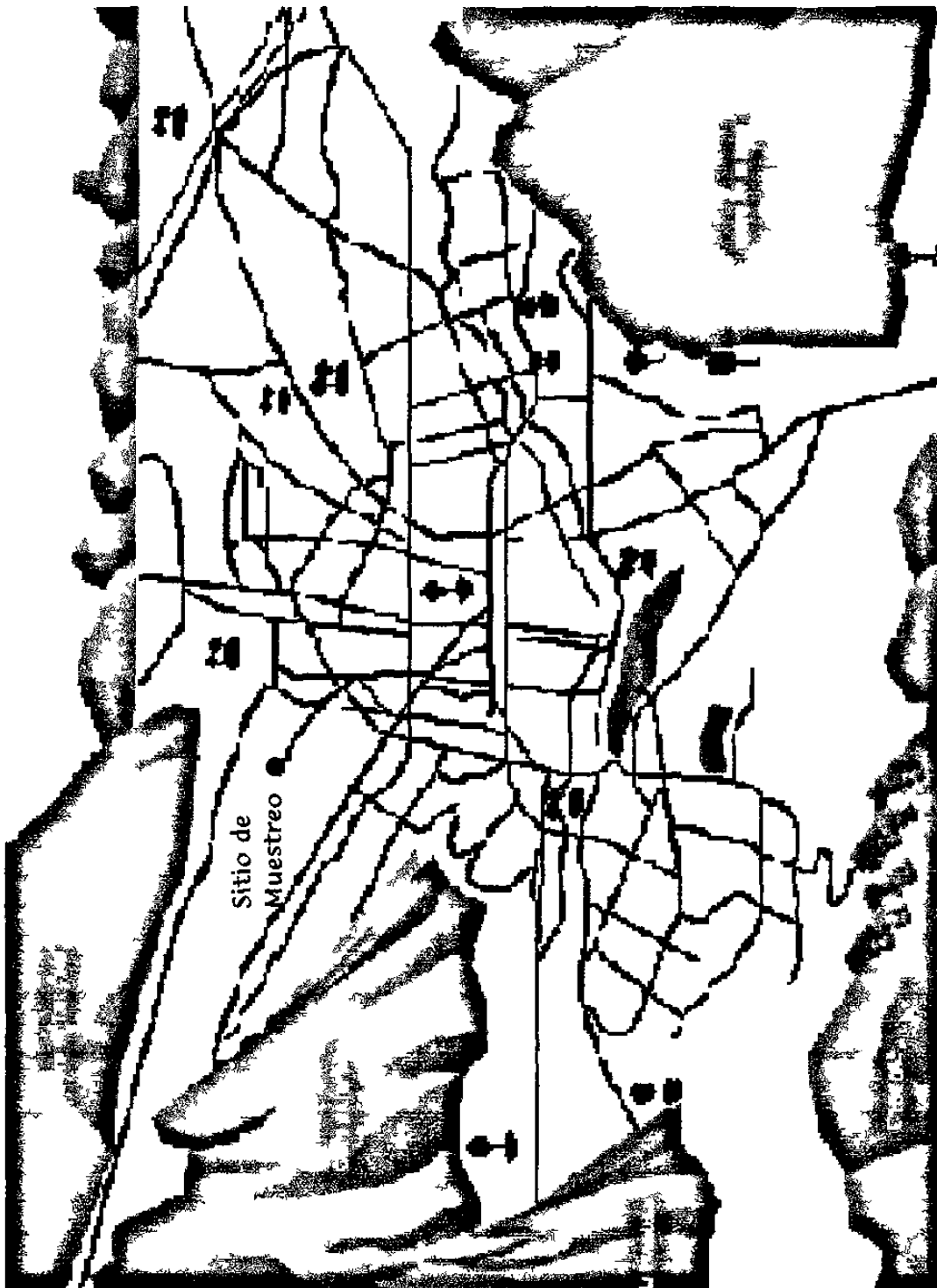


Figura 1.2. Mapa de la ciudad de Monterrey mostrando las principales avenidas y el sitio de monitoreo.

### 2.3 Irradiación de las muestras

El proceso que se lleva a cabo al aplicar el método de espectroscopía de Rayos-X mediante el uso de protones, consiste en irradiar la muestra, detectar la radiación característica y cuantificar la concentración de los elementos presentes en la muestra. Esto implica contar con un equipo que contiene una serie de aparatos como son: un acelerador de partículas, un detector de radiación y equipo electrónico periférico (figura 2.2).

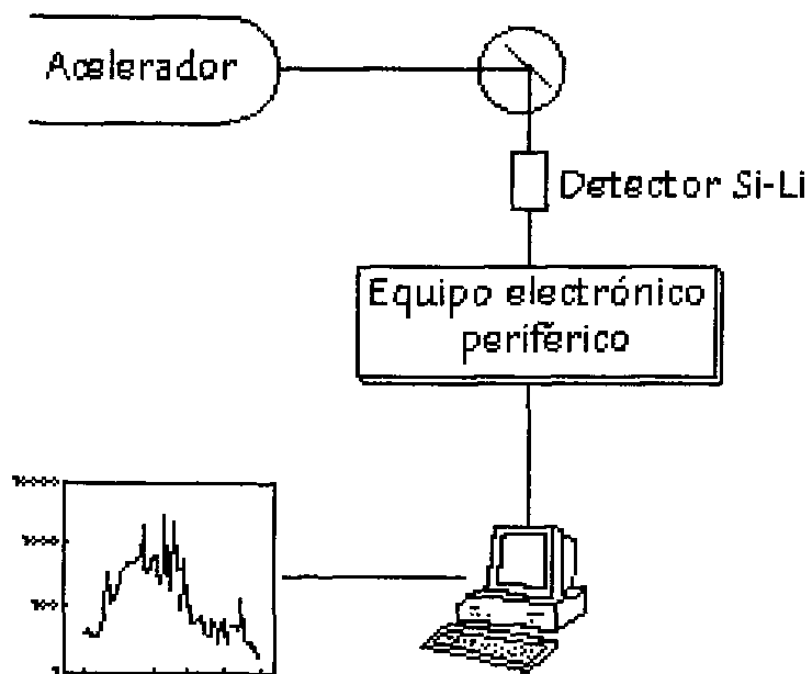


Figura 2.2. Diagrama del Análisis PIXE.

Las muestras, sin tratamiento previo, se colocaron en una regleta, la cual se introdujo verticalmente en la cámara PIXE, donde se produce la emisión de rayos-X, los cuales son registrados por el sistema de detección.

Se utilizaron protones de 2.5 MeV provenientes del acelerador Tandem Van de Graaff del ININ para irradiar las muestras colectadas. La intensidad de corriente que se utilizó fue de 6 nA en promedio. Los espectros de Rayos-X característicos (cuentas contra canal), se obtuvieron con un convertidor analógico digital (ADC), el cual procesa la información del detector de Si(Li).

#### *2.4 Análisis Cualitativo y Cuantitativo*

Para llevar a cabo el análisis cualitativo y cuantitativo fue necesaria la elaboración de curvas de calibración y el empleo de programas de análisis desarrollados para la espectroscopía de rayos-X.

Las curvas de calibración se elaboraron irradiando una serie de estándares espectroscópicamente puros y de densidad de área conocida, los cuales cubrieron la región de interés en número atómico  $Z^{28,29}$ . Estas curvas permitieron realizar la identificación de los elementos y la cuantificación de la concentración de los mismos.

### 2.4.1 Análisis Cualitativo (Curva de Energía Contra Canal)

El primer paso en el análisis es identificar los elementos que aparecen en el espectro (picos) al irradiar la muestra. El proceso que se sigue para la identificación se basa en el hecho de que la energía emitida por los átomos de los elementos presentes en la muestra es característica de cada elemento.

Para el análisis cualitativo se irradiaron una serie de estándares de elementos conocidos. Los espectros de los elementos se obtuvieron graficando el número de cuentas contra el canal. El pico de cada elemento se posicionó en un canal específico y el valor de su energía de emisión se localizó en tablas<sup>12</sup>. Los valores de energía se graficaron con respecto al canal, generándose así la curva de calibración de energía contra canal (figura 2.3). Esta curva permitió identificar a los elementos presentes en las muestras. La identificación de los elementos se realizó de forma directa para los casos en que éstos coincidieron con los estándares, en los otros casos la identificación se realizó interpolando gráficamente o bien utilizando la relación determinada entre energía y canal cuyo valor fue  $m = 0.0269 \text{ KeV/canal}$ .

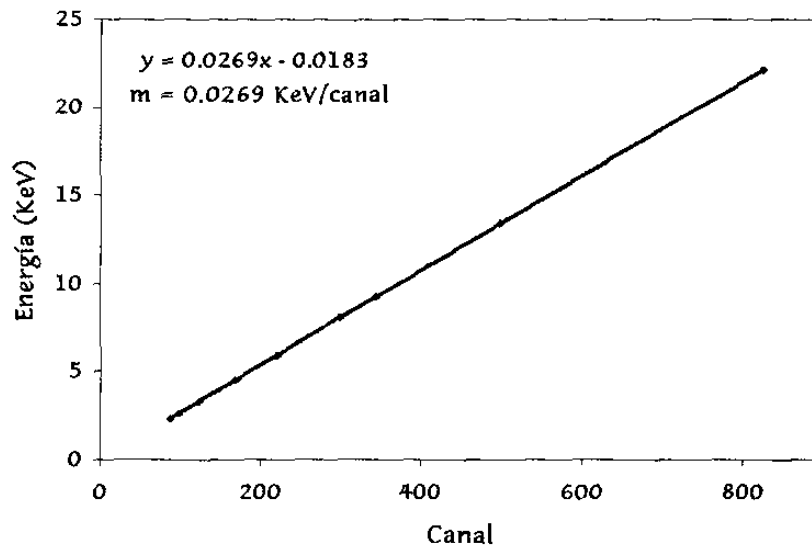


Figura 2.3. Curva de energía contra canal

#### 2.4.2 Análisis Cuantitativo (Curva de Sensitividad)

El siguiente paso en el análisis es conocer las concentraciones en las que están presentes los elementos detectados. En este proceso, se considera que el área neta de un pico es proporcional a la concentración del elemento que dió origen a ese pico.

Bajo estas consideraciones se tendrá que, para una muestra de masa  $M(Z)$  colectada de manera uniforme sobre una película muy delgada, de la cual una sección de área  $S$  ha sido bombardeada por un haz de protones de intensidad constante, la producción de rayos-X

característicos  $Y_0(Z)$  debidos al paso de  $N_p$  protones está dada por la expresión<sup>12</sup>:

$$Y_0(Z) = \frac{N_p M(Z) \sigma_Z(E_0) w_Z b_Z^\alpha \varepsilon_Z N_{av}}{S A_Z} \quad 2.1$$

donde  $Z$  y  $A_Z$  son el número atómico y la masa atómica del elemento,  $\sigma_Z(E_0)$  es la sección transversal de ionización para la energía del protón  $E_0$ ,  $w_Z$  es el factor de fluorescencia K o L,  $b_Z$  es la fracción de la línea  $L\alpha$  a la línea  $K\alpha$ ,  $\varepsilon_Z$  es la eficiencia del detector, y  $N_{av}$  es el número de Avogadro.

En la ecuación anterior el término  $M(Z)/S$  representa la densidad de área.

De la misma forma otros términos de la ecuación 2.1 pueden ser combinados en la expresión dada para el término sensibilidad  $k(Z)$  para blanco delgado. Así la sensibilidad es definida como las cuentas de rayos-X característicos detectados por nanogramo/cm<sup>2</sup> del elemento en el blanco y por microcoulomb del haz de protones.  $k(Z)$  viene dada por la siguiente expresión:

$$k(Z) = \frac{\sigma_Z(E_0) w_Z b_Z^\alpha \varepsilon_Z N_{av}}{A_Z} \quad 2.2$$

Sustituyendo  $\eta$  y  $k(Z)$  en la ecuación 2.1 tenemos:



$$Y_0 = k(Z)N_p\eta \quad 2.3$$

En la ecuación anterior,  $Y_0(Z)$  se obtuvo midiendo el área del pico del elemento a cuantificar;  $N_p$  es la carga a la cual se irradió la muestra;  $\eta$  es la densidad de área (parámetro a evaluar);  $k(Z)$  es la sensibilidad de la técnica para detectar un elemento.

El cálculo de la densidad de área para un elemento determinado se realiza a partir de la relación 2.4, como se expresa enseguida:

$$\eta = \frac{Y_0}{k(Z)N_p} \quad 2.4$$

$k(Z)$  se evalúa a partir de estándares, en este caso los mismos que se emplearon en la curva de energía contra canal. Los valores experimentales de  $k(Z)$  se obtuvieron a partir de la relación de la producción de rayos-X (área neta del pico del estándar,  $(Y_0)$ , de la densidad de área del estándar ( $\eta_{std}$ ) y de la carga eléctrica ( $Q$ ) depositada en el filtro durante la irradiación. Estos valores son graficados contra el número atómico del elemento evaluado en cada estándar generando así la curva de sensibilidad del sistema (figura 2.4). Esta curva nos permite conocer los valores de  $k(Z)$  para cada elemento detectado ya sea evaluado directamente o por métodos de interpolación cuando el elemento detectado en la muestra no corresponda a alguno de los estándares utilizados.

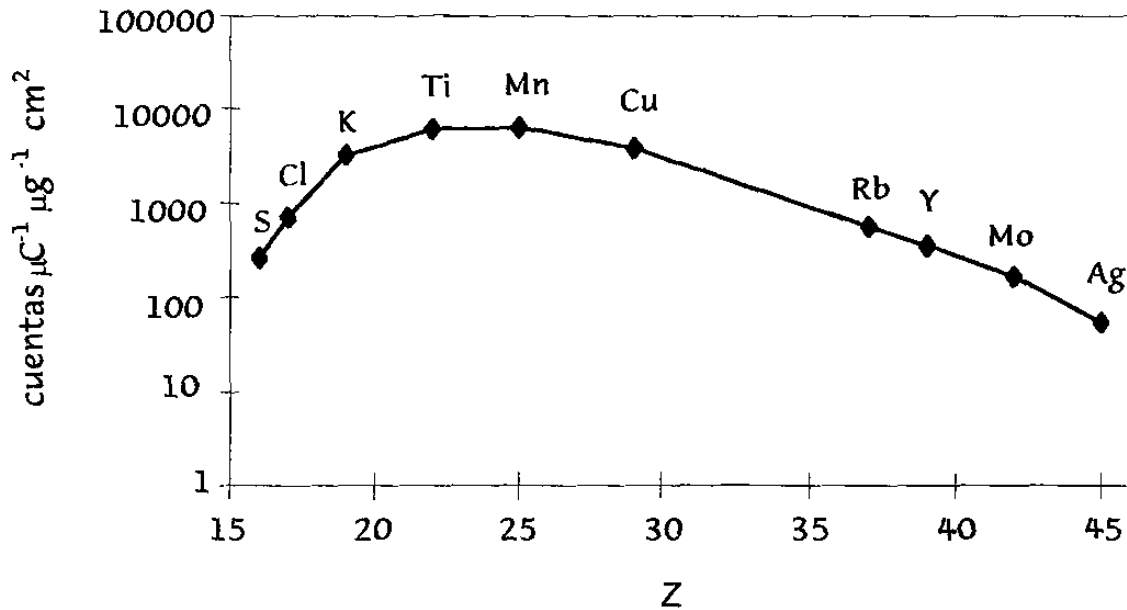


Figura 2.4. Curva de sensibilidad del sistema

Una vez conocidos los valores de  $k(Z)$  y aplicando la ecuación 2.4 se obtuvieron los valores de la densidad de área para cada elemento y a partir de estos valores las concentraciones elementales en  $\text{ng}/\text{m}^3$  utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\eta A}{V} \quad 2.5$$

que incluye la densidad de área ( $\text{ng}/\text{cm}^2$ ), el área del filtro ( $\text{cm}^2$ ) y el volumen de aire filtrado ( $\text{m}^3$ ).

### 2.4.3 Límite de Detección Mínimo (LDM)

En tanto más bajo sea el límite de detección de una técnica más grande será su poder de análisis en lo que se refiere a su sensibilidad.

Para PIXE, al igual que para otras técnicas espectrométricas el *LDM* está determinado por el factor de sensibilidad  $k(Z)$  y por la intensidad del fondo continuo. Este límite está definido como la cantidad o concentración del elemento analito que producirá un pico de área igual a tres veces la raíz cuadrada de la intensidad del fondo ( $N_b$ ) en el intervalo espectral de la línea principal de rayos-X.

$$LDM = 3\sqrt{N_b} \quad 2.6$$

donde  $N_b$  es el número total de cuentas o intensidad del fondo cuya integración está definida en términos del FWHM (Full Width at Half Maximum) de la línea principal de rayos-X<sup>28,30</sup>. El límite de detección fue considerado para eliminar aquellos valores espurios de concentración que se presentaron al evaluarla mediante programas de computo que se mencionan en los párrafos siguientes.

#### 2.4.4 Evaluación del espectro

Una vez irradiadas las muestras y colectada la información a través del multicanal y el detector, un convertidor analógico digital (ADC) procesa los datos y genera el espectro de rayos-X característicos de los elementos presentes. La figura 2.5 muestra cuatro espectros de emisión de rayos-X característicos obtenidos para partícula fina, para partícula gruesa y para los filtros utilizados.

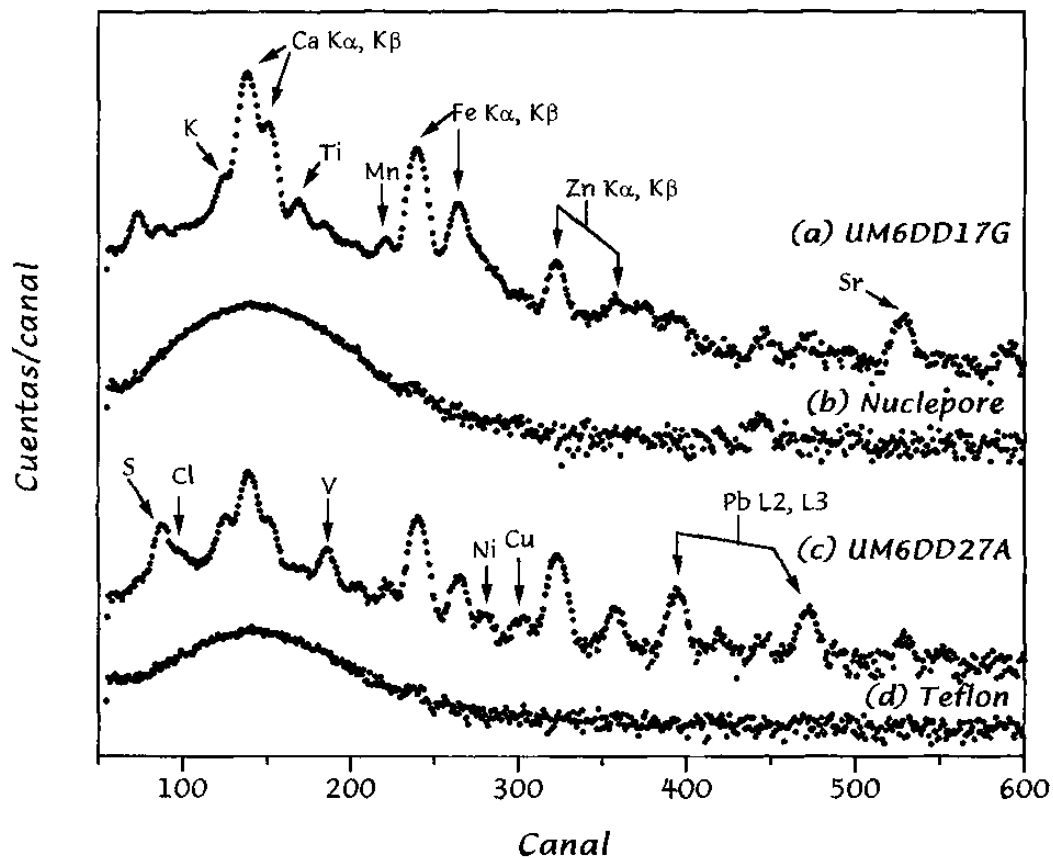


Figura 2.5. Espectros típicos de Rayos-X característicos obtenidos durante el análisis PIXE, para partícula gruesa,  $PM_{15}$  (a), para el filtro de nuclepore (b), para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) (c) y para el filtro de teflon (d).

La figura 2.5 nos permite observar que el espectro de rayos-X característicos se encuentra superpuesto sobre un fondo de radiación continua o bremsstrahlung (*b* y *c*), el cual se genera por la desaceleración que experimentan las partículas cargadas (electrones secundarios y protones) al pasar por la matriz. Dicho fondo debe ser eliminado del espectro para evaluar el área neta de los picos.

Existen diversos programas de computo que permiten conocer el área de los picos presentes en el espectro<sup>31</sup>, parámetro relacionado con la concentración de los elementos, de ahí la importancia de su evaluación. En este trabajo se emplearon, los programas de computo Maestro II y Axil.

El Maestro II es un programa asociado a un multicanal que procesa la información proveniente del detector y genera el espectro de rayos-X característicos. Este programa permite realizar parte del análisis de los espectros. Dentro de las funciones que maneja este programa están: la comparación de espectros, la medición del FWHM (Full Width at Half Maximum), la integración de áreas (con la desventaja de no deconvolucionar dos picos continuos traslapados), etc<sup>32</sup>.

El Axil (Analysis of X-ray Spectra by Iterative Least squares fitting), es un programa que a través de un método iterativo no lineal de ajuste por mínimos cuadrados permite realizar el análisis cuantitativo ajustando las áreas de los picos del espectro y realizando

una deconvolución a aquellos picos que se traslapan, este programa realiza un ajuste del fondo y permite conocer el área neta de los picos<sup>33</sup>.

R  
E  
S  
U  
L  
T  
A  
D  
O  
S

## Capítulo III

### 3.1 Análisis Cualitativo y Cuantitativo.

El cálculo de las concentraciones se realizó de acuerdo a lo descrito en el apartado 2.4.2, calculándolas a partir de 2 expresiones la 2.4 y la 2.5. A partir de la ecuación 2.4 se obtuvieron los valores de densidad de área ( $\eta$  en  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) los cuales fueron introducidos en la ecuación 2.5 para realizar un ajuste de unidades y obtener los valores de concentraciones en  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Los resultados se presentan en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

Tabla 3.1. Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula fina ( $\text{PM}_{2.5}$ ) durante el día.

FECHA	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
	LDM											
	109	49	17	13	8	7	5	4	4	4	5	23
10DIC	1588	ND	327	1735	13	39	25	317	ND	11	210	144
12DIC	1187	ND	220	1855	ND	22	13	164	ND	5	111	77
13DIC	923	ND	212	2237	ND	23	11	173	ND	7	79	71
17DIC	2882	ND	156	2920	15	15	5	177	ND	ND	30	51
18DIC	195	ND	157	1054	10	ND	5	107	ND	ND	25	ND
19DIC	ND	ND	194	1554	11	ND	5	130	ND	9	269	47
20DIC	252	ND	260	2691	10	12	ND	140	ND	5	259	62
23DIC	2802	ND	347	1616	8	36	9	165	5	8	104	135
24DIC	596	ND	271	1622	6	9	8	147	ND	11	54	102
25DIC	2598	1324	231	48	ND	32	ND	32	7	5	51	79
26DIC	5255	539	471	1293	ND	82	17	356	10	15	303	286
27DIC	4021	315	441	1566	ND	66	15	307	12	16	212	379
30DIC	1622	ND	354	3591	ND	26	10	182	ND	6	114	66
31DIC	2505	ND	274	1413	ND	17	ND	111	7	15	79	98
01ENE	4712	ND	445	910	ND	55	ND	148	6	6	100	90
02ENE	6280	ND	336	1092	11	69	8	207	8	7	147	106
03ENE	3042	ND	269	1581	14	29	11	222	4	6	100	94
06ENE	1250	54	158	810	13	ND	ND	126	ND	5	43	43
07ENE	402	227	112	702	ND	ND	ND	40	ND	5	18	ND
08ENE	2575	719	177	379	12	39	19	259	ND	11	243	174
09ENE	653	141	158	1301	12	12	7	124	ND	ND	122	77
10ENE	ND	214	251	2925	ND	ND	9	170	ND	ND	71	30
13ENE	1882	904	219	278	ND	ND	ND	52	ND	10	70	64
14ENE	4003	1977	310	586	ND	11	6	53	ND	23	296	283

ND = No Detectado



Tabla 3.2. Concentraciones elementales (ng/m<sup>3</sup>) y para partícula fina (PM<sub>2.5</sub>) durante la noche.

FECHA	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
	LDM											
	109	49	17	13	8	7	5	4	4	4	5	23
09DIC	653	ND	193	1209	9	13	6	137	ND	4	41	33
11DIC	3261	ND	400	2469	13	40	12	231	10	12	135	132
12DIC	1331	55	290	1286	12	16	8	212	ND	8	99	97
13DIC	4455	124	222	395	10	93	ND	95	13	ND	140	165
16DIC	790	388	244	1384	13	17	10	168	ND	ND	104	73
17DIC	280	ND	337	3982	34	ND	14	416	ND	ND	22	ND
18DIC	ND	ND	170	1328	17	ND	8	167	ND	ND	21	ND
19DIC	288	175	210	1005	9	14	5	130	ND	8	125	58
20DIC	1001	145	270	1472	8	20	11	200	4	6	94	83
23DIC	1071	ND	408	2122	28	14	9	207	ND	9	142	110
24DIC	1430	789	550	935	9	24	ND	113	ND	ND	58	83
25DIC	4578	1110	341	88	ND	73	ND	80	10	7	166	275
26DIC	5831	1032	406	1347	16	30	10	218	ND	17	257	176
27DIC	2707	556	376	1692	ND	28	11	189	5	12	187	136
30DIC	1649	115	326	1412	14	16	6	174	ND	23	154	90
31DIC	3279	4056	3384	883	29	39	7	113	ND	8	123	365
01ENE	3521	338	286	601	ND	27	6	167	5	8	189	89
02ENE	2562	ND	231	1198	14	20	9	156	ND	ND	100	71
03ENE	304	ND	213	1637	9	ND	6	155	ND	ND	13	50
06ENE	552	ND	67	438	8	ND	ND	55	ND	ND	7	ND
07ENE	1753	328	77	225	ND	13	ND	46	3	5	64	93
08ENE	2910	1508	314	645	ND	56	10	169	9	15	376	294
09ENE	430	269	245	2047	14	16	5	216	ND	6	115	37
10ENE	466	201	238	1177	ND	12	9	132	ND	6	60	66
13ENE	1788	401	156	210	ND	14	ND	41	ND	ND	52	38
14ENE	6046	3085	538	568	13	60	28	449	ND	21	577	337

ND = No Detectado

Tabla 3.3. Concentraciones elementales (ng/m<sup>3</sup>) para partícula gruesa (PM<sub>10</sub>) durante el día.

FECHA	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Pb
	LDM										
	293	50	39	25	20	13	11	9	9	55	51
10DIC	366	281	8545	45	23	ND	955	11	134	75	ND
12DIC	ND	204	5782	32	ND	ND	378	ND	52	ND	ND
13DIC	603	343	12031	39	22	ND	528	21	112	ND	59
17DIC	ND	660	16169	114	27	23	1157	37	53	96	ND
18DIC	ND	97	1679	39	ND	ND	153	ND	13	ND	ND
19DIC	ND	201	4223	37	ND	ND	440	ND	114	ND	ND
20DIC	ND	280	8345	32	ND	ND	420	ND	115	ND	ND
23DIC	673	373	9836	54	28	13	813	15	179	ND	58
24DIC	306	414	10546	71	ND	ND	902	14	120	71	ND
25DIC	456	53	417	ND	ND	ND	132	ND	87	ND	ND
26DIC	1233	447	9767	38	43	21	1077	20	407	ND	96
27DIC	1156	489	13550	71	77	21	1332	26	282	159	115
30DIC	ND	4004	10330	ND	ND	ND	497	15	68	142	ND
31DIC	466	338	10521	45	21	ND	543	13	106	81	ND
01ENE	421	202	5055	ND	ND	ND	427	ND	77	74	ND
02ENE	457	200	5793	26	ND	ND	473	ND	57	ND	ND
03ENE	ND	531	10561	77	20	18	1141	17	90	ND	ND
06ENE	296	163	2903	ND	ND	ND	297	ND	24	ND	ND
07ENE	ND	52	1342	ND	ND	ND	115	ND	ND	ND	ND
08ENE	ND	70	1259	25	ND	ND	206	ND	64	ND	ND
09ENE	ND	169	4565	34	ND	ND	309	ND	105	ND	ND
10ENE	547	313	9270	50	ND	ND	768	11	176	ND	ND
13ENE	301	58	1696	ND	ND	ND	110	ND	36	ND	ND
14ENE	412	105	2970	ND	ND	ND	176	ND	267	ND	75

ND = No Detectado

Tabla 3.4. Concentraciones elementales ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) para partícula gruesa ( $\text{PM}_{10}$ ) durante la noche

FECHA	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Pb
	LDM											
	293	120	50	39	25	20	13	11	9	9	55	51
09DIC	ND	ND	621	13885	41	ND	20	899	32	48	ND	ND
11DIC	556	ND	504	16179	88	39	23	910	36	66	ND	68
12DIC	ND	ND	325	8041	59	ND	ND	768	9	93	ND	ND
13DIC	308	139	90	1545	ND	ND	ND	201	ND	81	ND	ND
16DIC	ND	ND	297	7924	47	ND	ND	516	17	66	ND	ND
17DIC	ND	ND	384	7339	72	ND	14	906	ND	22	ND	ND
18DIC	ND	ND	89	1503	ND	ND	ND	138	ND	N	ND	ND
19DIC	ND	197	179	3671	28	ND	ND	353	ND	217	ND	ND
20DIC	315	ND	524	12275	61	27	18	934	24	103	ND	53
23DIC	338	ND	681	15897	124	ND	21	1038	43	73	ND	55
24DIC	ND	ND	159	2366	ND	ND	ND	279	ND	54	ND	ND
25DIC	552	ND	50	1103	ND	ND	ND	151	ND	191	ND	ND
26DIC	887	156	420	10516	52	28	ND	1013	16	237	ND	65
30DIC	ND	ND	592	11409	37	23	16	774	17	89	ND	ND
31DIC	ND	200	427	7506	40	ND	ND	447	10	71	ND	ND
01ENE	ND	ND	100	2496	ND	ND	ND	261	ND	37	ND	ND
02ENE	1049	121	402	11855	53	25	ND	657	24	66	ND	ND
03ENE	ND	ND	271	6769	41	ND	ND	514	ND	29	ND	ND
06ENE	ND	ND	60	1166	ND	ND	ND	135	ND	N	ND	ND
07ENE	ND	ND	ND	641	ND	ND	ND	51	ND	20	ND	ND
08ENE	302	188	118	3137	ND	25	ND	321	ND	310	ND	149
09ENE	ND	392	254	8890	27	ND	ND	532	ND	330	ND	ND
10ENE	ND	ND	208	5620	35	ND	ND	449	ND	55	ND	ND
13ENE	ND	ND	ND	701	ND	ND	ND	52	ND	14	ND	ND
14ENE	1626	175	155	4103	ND	21	ND	484	ND	160	ND	ND

ND = No Detectado

### *3.2 Tratamiento de los datos*

Una vez obtenidos los valores de concentración se procedió a realizar un tratamiento de los datos lo que facilitó la interpretación de los resultados y el establecimiento de posibles fuentes como origen de los contaminantes detectados. El tratamiento consistió en realizar:

- 1) Diagramas de Variación Temporal*
- 2) Cálculo de Factores de Enriquecimiento*
- 3) Análisis de Factores*

#### *3.2.1 Diagramas de Variación Temporal*

Los diagramas de variación temporal son la representación gráfica de los valores de concentración, para cada elemento, con respecto a la fecha de monitoreo de la muestra. Este tipo de diagramas permite apreciar la variación de los diferentes elementos detectados durante el período de muestreo. Los eventos durante los cuales los niveles de contaminación se ven incrementados pueden ser observados en estos diagramas. Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 son ejemplos de este tipo de diagramas en particular para Pb, V y Fe.

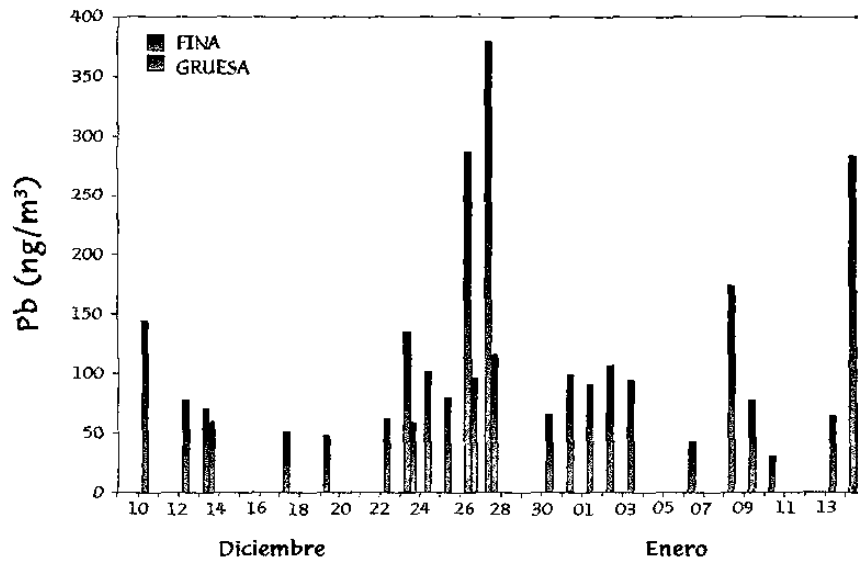


Figura 3.1. Variación temporal de Pb para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) y gruesa ( $PM_{10}$ ) durante el día.

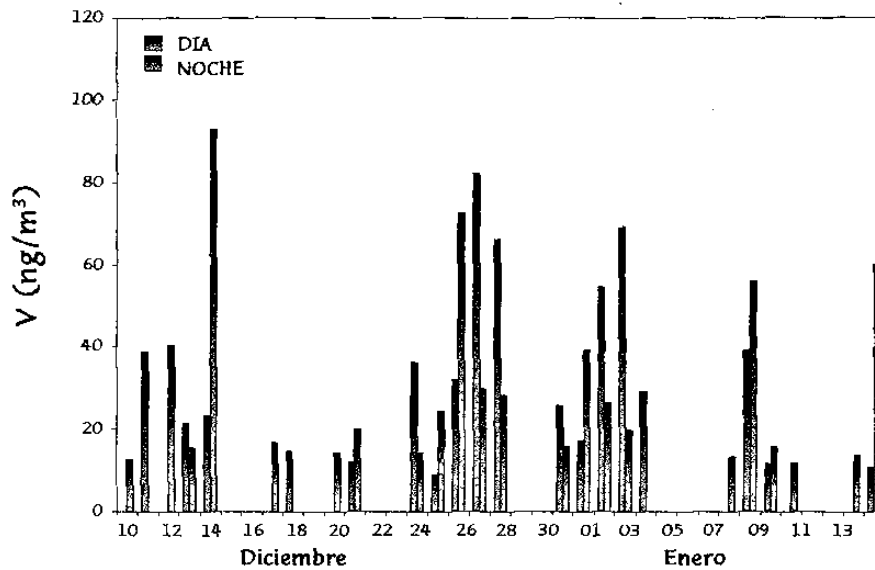


Figura 3.2. Variación temporal de V para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día y la noche.

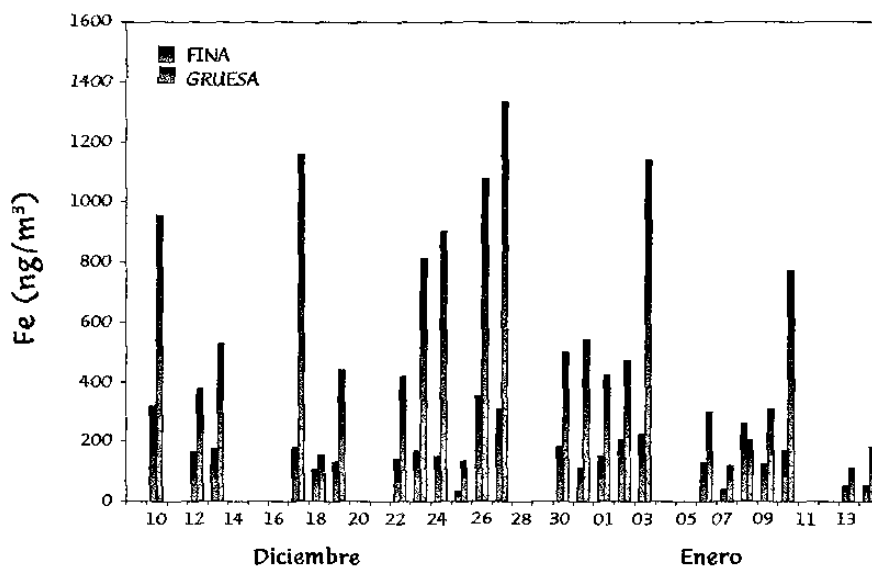


Figura 3.3. Variación temporal de Fe para partícula fina ( $PM_{2,5}$ ) y gruesa ( $PM_{10}$ ) durante el día.

### 3.2.2 Cálculo de Factores de Enriquecimiento

El análisis de factores de enriquecimiento (*FE*) es empleado para clasificar a los contaminantes en dos grandes grupos, según su origen. Estos grupos son: natural, es decir aquellos contaminantes provenientes de la naturaleza y antropogénico, aquellos contaminantes provenientes de actividades realizadas por el hombre<sup>34,35</sup>.

El cálculo de *FE* se basa en calcular una razón de razones que permite establecer el nivel de enriquecimiento de determinados elementos en la atmósfera, al compararlos con un elemento muy abundante en la corteza terrestre como Al, Si, Fe o Ca<sup>36</sup>; en este caso se

empleó el Fe como elemento de referencia la razón para el cálculo de *FE* se expresa algebraicamente a continuación:

$$FE = \frac{\left( \frac{X_m}{Fe_m} \right)}{\left( \frac{X_c}{Fe_c} \right)} \quad 3.2$$

donde:  $X_m$  y  $Fe_m$  son las concentraciones del elemento X y del Fe en la muestra;  $X_c$  y  $Fe_c$  son las concentraciones del elemento X y del Fe en la corteza terrestre.

Además de clasificar a los elementos en dos grandes grupos, según su valor de *FE*, los elementos provenientes de actividades antropogénicas pueden ser clasificados, de acuerdo a su abundancia, en enriquecidos y altamente enriquecidos, como se comentó previamente, se han definido bandas entre ciertos valores que permiten clasificar a los contaminantes en una u otra categoría<sup>35</sup>. Así aquellos contaminantes que presenten un valor de *FE* entre 1 y 10 se consideran provenientes de la naturaleza; un valor de *FE* entre 10 y 500 será obtenido para los elementos de origen antropogénico con abundancia enriquecida; un valor superior a 500 será obtenido para elementos con abundancia altamente enriquecida.

Debe recordarse que la información obtenida mediante este factor es precaria en cuanto a fuentes se refiere, sin embargo, su mayor y principal contribución es en cuanto a la abundancia, que no es fácil deducir de otro análisis

Los resultados de estos factores se reportan en la tabla 3.5 y son representados mediante gráficas de barras en las figuras 3.4 y 3.5 gráficas de barras.

Tabla 3.5. Factores de Enriquecimiento referidos al Fe para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) y gruesa ( $PM_{10}$ ) durante el día y la noche.

	$PM_{2.5}$		$PM_{10}$	
	Día	Noche	Día	Noche
S	1376.56	1194.82	94.99	123.97
Cl	627.79	761.65	-	61.04
K	3.14	4.57	1.45	1.13
Ca	12.62	9.87	17.25	17.94
Ti	0.78	0.97	1.00	1.19
V	67.24	57.76	19.55	17.51
Mn	3.23	2.74	1.73	1.83
Fe	1.00	1.00	1.00	1.00
Ni	27.62	28.56	20.43	27.85
Cu	39.75	41.92	-	-
Zn	301.49	292.00	81.07	78.33
Sr	-	-	29.88	-
Pb	2231.24	2349.62	452.84	471.71

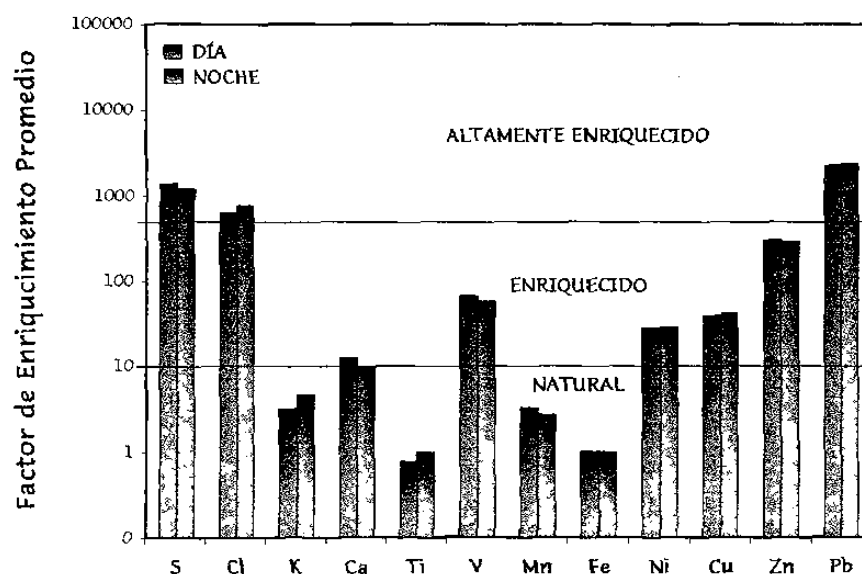


Figura 3.4. Factores de Enriquecimiento para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día y la noche.



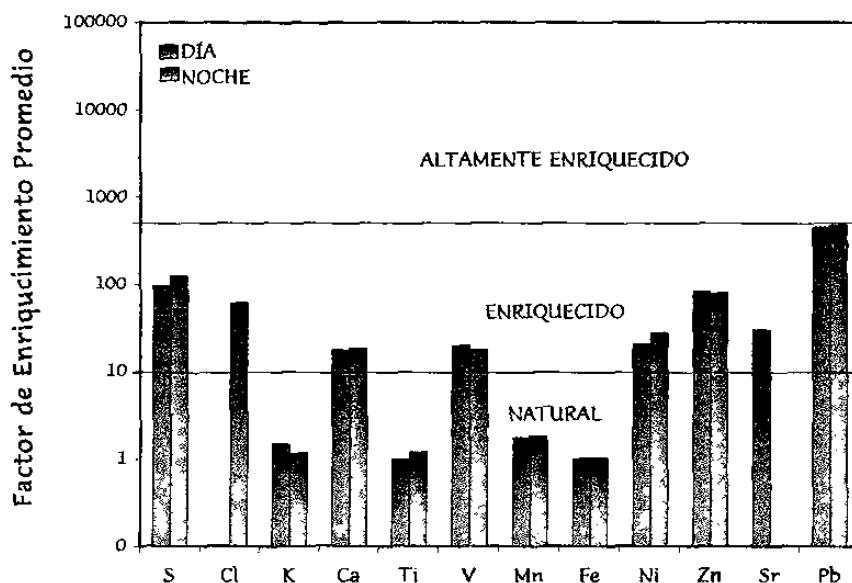


Figura 3.5. Factores de enriquecimiento para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día y la noche.

### 3.2.3 Análisis de Factores

La capacidad de la técnica PIXE para detectar una gran cantidad de elementos durante el análisis de una muestra y la rapidez con la que se realiza este análisis produce una gran cantidad de datos, lo que dificulta el tratamiento de los mismos si el propósito es explotar el potencial de éstos para averiguar las fuentes de donde provienen<sup>37</sup>.

En las investigaciones de contaminación ambiental las técnicas estadísticas, como Análisis de Clusters, Análisis de Factores, etc. se utilizan para realizar análisis multivariado y han sido aplicadas a datos de composición elemental de aerosoles y a distribuciones de

contaminantes espaciales, etc. como se puede constatar en la literatura<sup>38-42</sup>. En este trabajo la técnica de análisis de factores es utilizada para el análisis de los datos de concentraciones elementales de aerosoles con la finalidad de proponer las posibles de fuentes de los contaminantes detectados en la atmósfera de la zona noroeste de la ciudad de Monterrey.

El objetivo de un análisis de factores es determinar un cierto número de factores comunes de tal manera que una cantidad aceptable de varianza en los datos observados se tome en cuenta. Este tipo de análisis supone que cada una de las variables (concentraciones) están relacionadas linealmente a un cierto número de factores fundamentales (fuentes), tal que los valores de las variables puedan ser expresados como un conjunto de  $n$  ecuaciones lineales, esto en otras palabras, significa que la cantidad de cada elemento en la muestra puede ser representada por una suma de contribuciones de cada una de las fuentes (porcentajes) que comprende el sistema<sup>40,41</sup>.

$$\begin{array}{l} Z_{ij} = a_{1i}F_{1j} + a_{2i}F_{2j} + \dots + a_{mi}F_{mj} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ Z_{nj} = a_{1n}F_{1j} + a_{2n}F_{2j} + \dots + a_{mn}F_{mj} \end{array}$$

donde:  $F$  es el factor fundamental y  $a$  representa su factor de peso.

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales se obtendrán los valores de los factores de peso " $a$ " asociados a cada uno de los factores

fundamentales "f", cuyo número fue asignado previamente para cada una de las variables. Estos factores son importantes debido a que en cada uno de ellos se agruparan los elementos contaminantes de acuerdo a las variables que presenten características comunes lo que permite sugerir las posibles fuentes de emisión de cada factor. Las variables a agruparse en cada factor serán aquellas que presenten valores de  $a \geq 0.5$ .

En un análisis de factores se recomienda seguir los pasos generales listados a continuación<sup>43</sup>:

1. Generar la matriz de correlación.
2. Seleccionar el modelo de factores que mejor convenga: componentes principales o factor común.
3. Seleccionar un criterio para determinar que características deberán presentarse en los factores: el ortogonal o el oblicuo.
4. Obtener una matriz de factores no rotada
5. Obtener una matriz de factores rotada
6. Obtener los valores de los puntajes de los factores encontrados

La matriz de correlación obtenida permite conocer una relación entre las mismas variables. El modelo de factores empleado en este trabajo es el de componentes principales, en este modelo las variables se agruparan de acuerdo a similitudes en su variación. El criterio ortogonal nos permite extraer factores que no presenten relación entre sí y fue el usado en este trabajo. La matriz de factores no rotada

permite determinar el número de factores fundamentales a extraer. El número de factores se determinó de acuerdo al criterio de la raíz latente, que indica que el número de factores a extraer es igual al número de factores con valor propio mayor que 1. La matriz de factores rotada permite agrupar las variables en alguno de los factores extraídos. La rotación de la matriz se realizó bajo el criterio varimax. Los factores pueden ser considerados como nuevas variables y ser empleados en análisis posteriores.

El análisis de factores fue realizado empleando el programa de computo SPSS versión 6.0. Los resultados del análisis de factores se presentan a continuación.

El primer paso en el análisis de factores fue la obtención de las matrices de correlación. Las tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los resultados obtenidos para partícula fina y gruesa tanto para el día como para la noche. Conforme a lo sugerido en la literatura<sup>44</sup> y para evitar deducciones erróneas del cálculo de  $r$  se realizó la prueba estadística  $t$  para conocer el valor de coeficiente de correlación a partir del cual éste es realmente significativo. Un valor de  $r > 0.55$  indicará una correlación lineal con un nivel de confianza del 99% para el número de pares de datos, en este caso 25, usados en su cálculo.

*Tabla 3.6. Matriz de correlación obtenida para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día.*

	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
S	1.0000									
Ca	-0.2753	1.0000								
Ti	-0.0247	0.0784	1.0000							
V	0.8178	-0.1133	-0.0916	1.0000						
Mn	0.1869	0.0948	0.1464	0.5283	1.0000					
Fe	0.3816	0.3047	0.2546	0.7095	0.8317	1.0000				
Ni	0.6714	-0.1744	-0.2953	0.7919	0.2164	0.4523	1.0000			
Cu	0.4379	-0.2822	-0.2920	0.2799	0.2865	0.2118	0.4086	1.0000		
Zn	0.3119	-0.0251	0.0079	0.4097	0.4531	0.4735	0.2869	0.6115	1.0000	
Pb	0.6112	-0.1933	-0.2015	0.6385	0.5057	0.5399	0.6900	0.8094	0.6543	1.0000

Tabla 3.7. Matriz de correlación obtenida para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante la noche.

	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
S	1.0000									
Ca	-0.3658	1.0000								
Ti	-0.0605	0.6338	1.0000							
V	0.7819	-0.3897	-0.1413	1.0000						
Mn	0.4039	0.2486	0.2402	0.2113	1.0000					
Fe	0.1882	0.6260	0.4815	0.0323	0.8403	1.0000				
Ni	0.4751	-0.1963	-0.2052	0.8309	-0.7585	-0.1486	1.0000			
Cu	0.5464	-0.0063	0.0379	0.2838	0.5056	0.4416	0.0534	1.0000		
Zn	0.7369	-0.2263	-0.5876	0.5867	0.7000	0.5032	0.2199	0.7658	1.0000	
Pb	0.7625	-0.3376	0.1256	0.7446	0.4122	0.1719	0.3966	0.5241	0.7392	1.0000

Tabla 3.8. Matriz de correlación obtenida para partícula gruesa ( $PM_{10}$ ) durante el día.

	K	Ca	Ti	Fe	Zn
K	1.0000				
Ca	0.3574	1.0000			
Ti	0.0234	0.7604	1.0000		
Fe	0.1623	0.8634	0.7974	1.0000	
Zn	0.6427	0.5353	0.3425	0.4318	1.0000

Tabla 3.9. Matriz de correlación obtenida para partícula gruesa ( $PM_{10}$ ) durante la noche.

	K	Ca	Ti	Fe	Zn
K	1.0000				
Ca	0.9519	1.0000			
Ti	0.7549	0.7840	1.0000		
Fe	0.9435	0.9208	0.7821	1.0000	
Zn	-0.0402	0.0520	-0.1500	0.1070	1.0000

Los siguientes resultados obtenidos fueron las matrices no rotadas, las cuales son presentadas para ambos tamaños de partícula para día y noche en las tablas 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13.

Tabla 3.10. Matriz de factores no rotada para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Pb	0.90959	-0.16379	0.22881
V	0.86863	0.06804	-0.44004
Ni	0.77567	-0.26480	-0.38000
S	0.75248	-0.23410	-0.42356
Fe	0.73132	0.64446	-0.07804
Zn	0.67587	0.10460	0.52849
Cu	0.67479	-0.38317	0.53366
Mn	0.63357	0.56643	0.19070
Ca	-0.15146	0.63978	0.05014
Ti	-0.11968	0.61833	-0.11799
Valor propio	4.63541	1.84196	1.19278

Tabla 3.11. Matriz de factores no rotada para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante la noche.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Zn	0.92113	0.12924	-0.27812
S	0.88544	-0.20035	0.03246
Pb	0.86431	-0.12598	0.08435
V	0.80041	-0.42941	0.37184
Cu	0.71000	0.26587	-0.35198
Mn	0.63477	0.61748	-0.16603
Fe	0.42401	0.84906	0.05032
Ca	-0.23740	0.80968	0.41644
Ti	0.00703	0.68126	0.49853
Ni	0.47255	-0.51292	0.60571
Valor propio	4.38670	2.81276	1.16661

Tabla 3.12. Matriz de factores no rotada para partícula gruesa ( $PM_{10}$ ) durante el día.

Variable	Factor 1	Factor 2
Ca	0.93617	-0.12386
Fe	0.89889	-0.30922
Ti	0.81174	-0.46380
Zn	0.72054	0.54033
K	0.46341	0.82232
Valor propio	3.07727	1.29424

Tabla 3.13. Matriz de factores no rotada para partícula gruesa ( $PM_{10}$ ) durante la noche.

Variable	Factor 1	Factor 2
Ca	0.97159	0.06942
K	0.96252	-0.01783
Fe	0.96039	0.12708
Ti	0.87545	-0.18947
Zn	-0.00650	0.99469
Valor propio	3.55924	1.04659

El agrupamiento de las variables en los factores extraídos se presenta en las tablas 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 las cuales muestran los resultados de las matrices rotadas para partícula fina y gruesa durante el día y la noche. Los diagramas de variación temporal de los puntajes de los factores se muestran en las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

Tabla 3.14. Matriz de factores rotada (varimax) para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante el día.

Variable	Factor 1 <i>Combustibles</i>	Factor 2 <i>Industria</i>	Factor 3 <i>Corteza</i>
V	0.93159	0.24115	0.16363
S	0.86456	0.17711	-0.14695
Ni	0.85649	0.22517	-0.17862
Cu	0.19422	0.84613	-0.36509
Zn	0.14885	0.84282	0.12058
Pb	0.54745	0.77140	-0.10851
Fe	0.53300	0.42288	0.70238
Ca	-0.21123	-0.06223	0.62151
Ti	-0.07508	-0.16778	0.61383
Mn	0.29164	0.56070	0.59933
Valor propio	3.12788	2.68680	1.85547

Tabla 3.15. Matriz de factores rotada (varimax) para partícula fina ( $PM_{2.5}$ ) durante la noche.

Variable	Factor 1 <i>Industria</i>	Factor 2 <i>Combustibles</i>	Factor 3 <i>Corteza</i>
Zn	0.90597	0.33820	-0.08586
Cu	0.83003	0.09732	-0.01582
Mn	0.81750	0.00763	0.37872
V	0.27761	0.93100	-0.13960
Ni	-0.12513	0.91337	-0.05810
S	0.59853	0.66383	-0.16216
Pb	0.58569	0.64957	-0.07104
Ca	-0.07332	-0.25396	0.90304
Ti	0.02784	0.00914	0.84371
Fe	0.63747	-0.09229	0.69882
Valor propio	3.38455	2.76062	2.22093



Tabla 3.16. Matriz de factores rotada (varimax) para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante el día.

Variable	Factor 1 <i>Corteza</i>	Factor 2 <i>Industria</i>
Ti	0.93490	-0.00171
Fe	0.93421	0.17574
Ca	0.87495	0.35529
K	-0.00386	0.94390
Zn	0.35908	0.82595
Valor propio	2.64128	1.73026

Tabla 3.17. Matriz de factores rotada (varimax) para partícula gruesa ( $PM_{15}$ ) durante la noche.

Variable	Factor 1 <i>Corteza</i>	Factor 2 <i>Industria</i>
Ca	0.97190	0.06487
K	0.96243	-0.02233
Fe	0.96098	0.12258
Ti	0.87455	-0.19357
Zn	-0.00184	0.99471
Valor propio	3.55918	1.04665

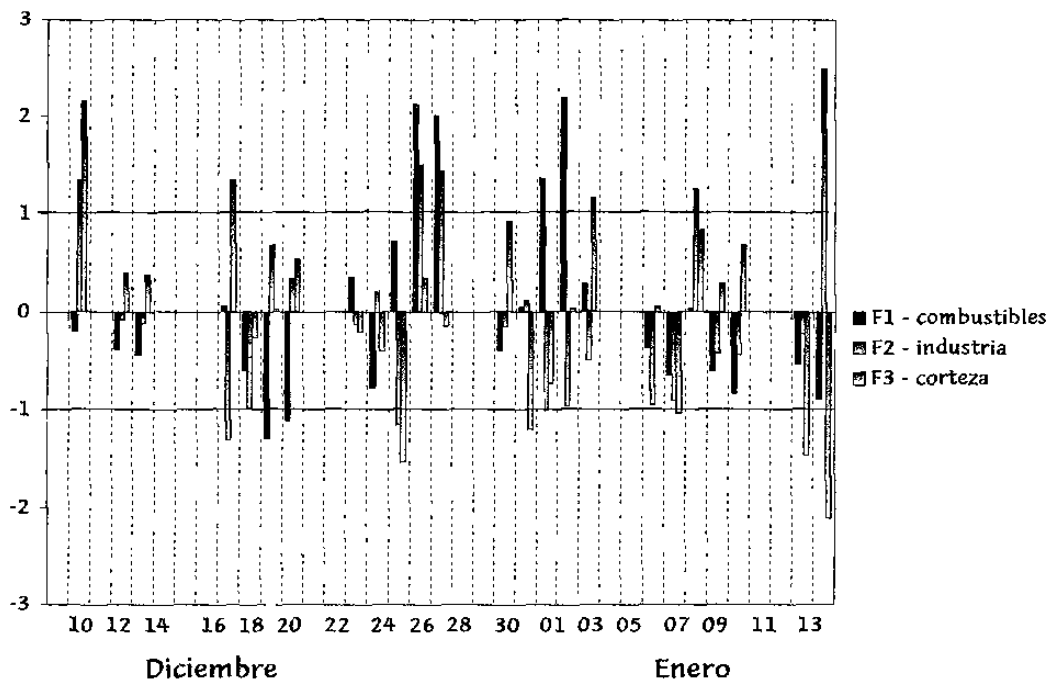


Figura 3.6. Variación temporal de los puntajes de F1, F2 y F3 para partícula fina (PM<sub>2.5</sub>) durante el día.

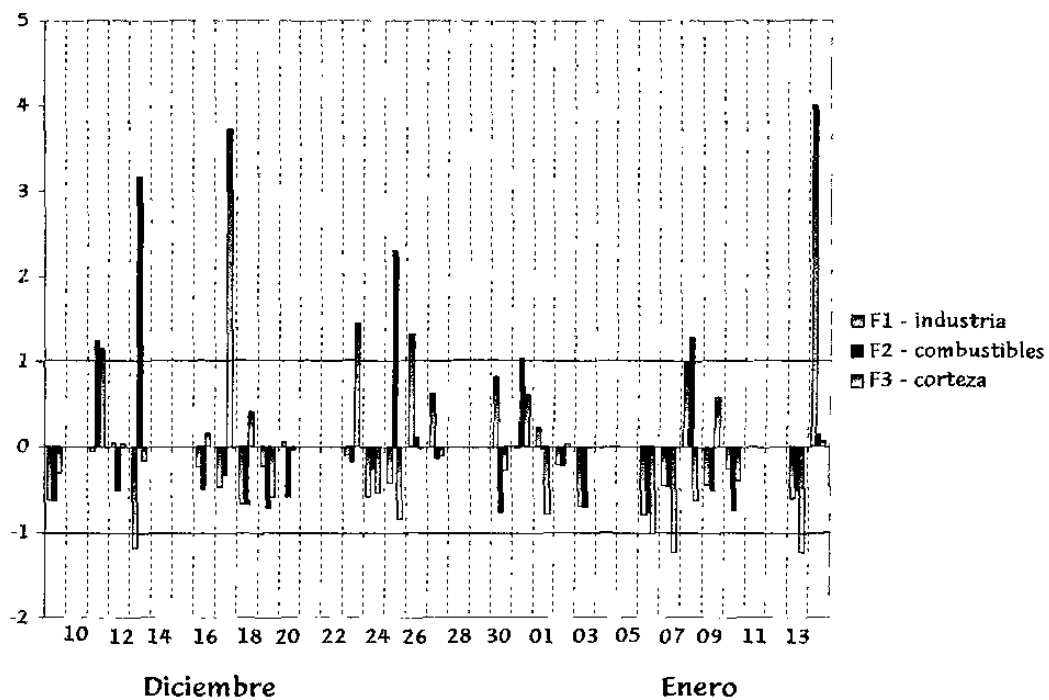


Figura 3.7. Variación temporal de los puntajes de F1, F2 y F3 para partícula fina (PM<sub>2.5</sub>) durante la noche.

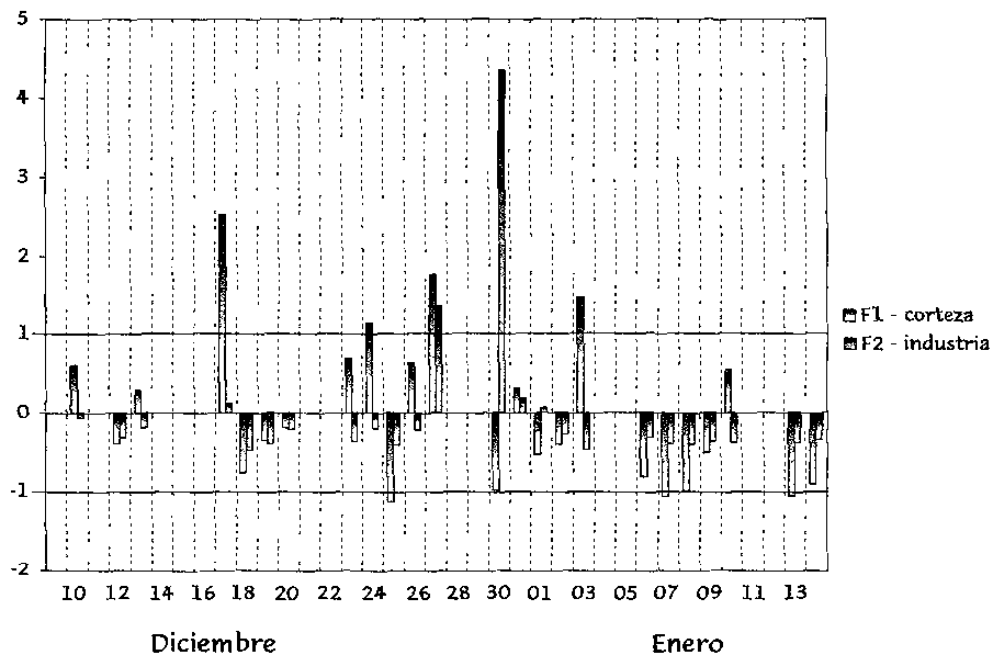


Figura 3.8. Variación temporal de los puntajes de F1 y F2 para partícula gruesa (PM<sub>10</sub>) durante el día.

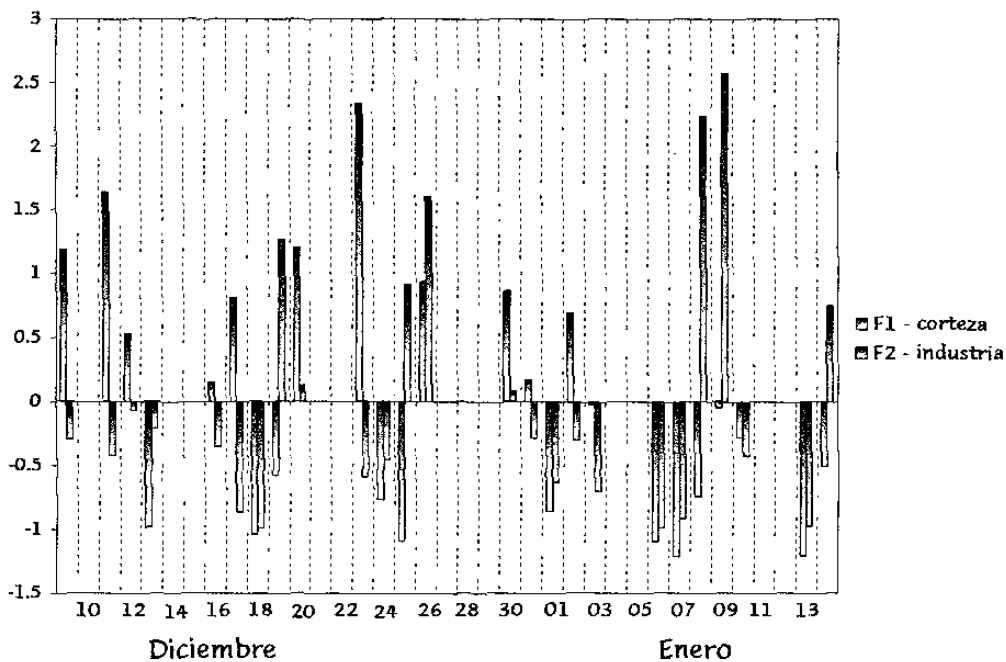


Figura 3.9. Variación temporal de los puntajes de F1 y F2 para partícula gruesa (PM<sub>10</sub>) durante la noche.

# Capítulo IV

D  
I  
S  
C  
U  
S  
I  
O  
N

#### 4.1. Partícula fina, $PM_{2.5}$

Se determinaron 12 elementos (S, Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Zn, Cu, Pb), en partícula fina durante el día y la noche.

Elementos como S, V, Ni, Cu, Zn y Pb, son catalogados como contaminantes de origen antropogénico, es decir, provenientes de actividades realizadas por el hombre, como por ejemplo la combustión (vehicular, doméstica, industrial)<sup>2,4,6,9,10</sup>. Por lo tanto, estos elementos se presentan en mayores cantidades en este tamaño de partícula, como puede observarse en la figura 3.1, la cual muestra la variación temporal de Pb en partícula gruesa y fina.

Las gráficas de variación temporal de los elementos anteriores permitieron apreciar que las partículas menores a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2.5}$ ), tienen una contribución importante en el problema de la contaminación atmosférica, y sin embargo, las instituciones correspondientes no se han preocupado por incursionar en este tamaño y en consecuencia no existen datos ni estudios relacionados con este parámetro en la ciudad de Monterrey.

Los niveles más altos de concentración de casi todos los elementos de origen antropogénico se registraron en los días en que las actividades humanas se incrementaron. Como ejemplo de esto se pueden citar las festividades de Navidad y Año Nuevo, durante las cuales hubo un incremento en la actividad vehicular y por lo tanto

mayor contaminación debida a los elementos provenientes de esta fuente de contaminación como son Pb, S, V, Ni<sup>5,35,46</sup>. La variación temporal de V se presenta en la figura 3.2, y muestra un incremento en los niveles de concentración durante los días cercanos a las festividades de Navidad y Año Nuevo

### *Análisis de Factores de Enriquecimiento*

El cálculo de factores de enriquecimiento nos permitió separar la componente antropogénica de la natural. La figura 3.4 muestra que S, Cl, V, Ni, Cu, Zn y Pb, son elementos cuyo origen es antropogénico ya que presentan valores de *FE* mayores a 10. De estos elementos S, Cl y Pb se encuentran altamente enriquecidos ( $FE > 500$ ). K, Ca Ti, Mn y Fe son elementos de origen natural, ya que se ubican dentro de la banda acotada por 1 y 10.

Las posibles fuentes de emisión de los elementos detectados, se sugieren en base al análisis de factores que se le aplicó a las concentraciones elementales obtenidas en este trabajo. En la primera fase del análisis las matrices de correlación dadas en las tablas 3.6 y 3.7 para día y noche, muestran que los elementos catalogados como antropogénicos se encuentran linealmente correlacionados, entre si. A partir de éstos datos se puede inferir que Pb, S, Ni, V provienen de una fuente común, siendo ésta la quema de combustibles<sup>5,36,45</sup>; Mn, Fe, Cu, Zn provienen de las actividades industriales (industria metal-

mecánica<sup>5,36,46</sup>); el resto de los elementos tienen como origen el desgaste de la corteza terrestre<sup>5,36,46</sup>. La matriz de correlación permite establecer únicamente pares de elementos que tengan una fuente de emisión común.

El siguiente paso en el análisis estadístico multivariado fue la extracción de los factores para este tamaño de partícula tanto para el período diurno como el nocturno.

El análisis de factores agrupó en 3 conjuntos aquellos elementos que se correlacionaban entre sí, esto permitió asignar a cada uno de ellos la fuente de emisión que de acuerdo con los procesos que se conocen se realizan en la región o de la información que se conoce sobre (por ejemplo) la corteza terrestre. Los resultados se presentan en las tablas 3.10 y 3.11 para día y noche respectivamente. La agrupación de las variables en los diferentes factores extraídos se presenta en las tablas 3.14 y 3.15 y se discute a continuación tanto para el período diurno como para el nocturno.

### *Período Diurno.*

#### *Análisis de Factores Fundamentales*

Durante el día, el factor 1 está constituido por V, S y Ni, los cuales provienen de la quema de combustibles<sup>45</sup>. Pb y Fe, aunque no son elementos que están propiamente ubicados en este factor, presentan valores de "α" que muestran una contribución considerable.

En el factor 2 se encuentran Cu, Zn, y Pb. Este factor es atribuido a las emisiones de la industria, estos elementos pueden provenir tanto de la industria metal-mecánica, como de la manufactura de pinturas. En este factor se encuentran otros elementos que contribuyen de una forma significativa, Fe y Mn, elementos provenientes de la industria del acero<sup>5,36,46</sup>.

El factor 3 es atribuido al desgaste de la corteza terrestre, los elementos que presentaron una mayor contribución a este factor fueron Fe, Ca, Ti, Mn<sup>5,36,46</sup>.

#### *Análisis de los Puntajes de los Factores Fundamentales*

La variación temporal de los puntajes de los factores fundamentales se muestra en la figura 3.6. Esta gráfica permitió detectar episodios durante los cuales los niveles de contaminación por



los elementos de uno u otro factor presentaron un valor muy diferente al promedio obtenido durante el periodo en estudio.

Los días en los que algunos de los factores fundamentales presentan un valor superior al promedio corresponde a los días en los que se registraron velocidades de viento menores a  $10 \text{ Km/h}^{47}$  por lo cual la dispersión de los contaminantes se vió afectada. El factor 1 (combustibles) muestra valores superiores al promedio los días 25 y 26 de diciembre, durante estos días los vientos registrados provenían de la dirección sureste, por lo tanto ya que el centro de la ciudad se ubica en esa trayectoria y es ahí donde se registra la mayor cantidad de trafico vehicular, esta contaminación fue desplazada hacia el sitio de monitoreo razón por la cual el análisis corrobora que la fuente asignada es correcta.

El factor 2 (industria) presenta un marcado incremento el día 14 de enero, este hecho se atribuye a que ese día y el anterior se registraron las temperaturas menores del período y los vientos que predominaron fueron menores a  $10 \text{ Km/h}$ , lo que dificultó la dispersión de los contaminantes, incrementándose de esta manera la concentración de los elementos adjudicados a la industria ya que se comprueba mediante este cálculo.

## *Período Nocturno*

### *Análisis de Factores Fundamentales*

El factor 1 está compuesto principalmente por Zn, Cu y Mn, y es atribuido a la industria. Estos elementos son empleados en la industria metal-mecánica, en la manufactura de pinturas, etc. Pb, S y Fe también contribuyen a este factor. El factor 2 se compone principalmente por V, Ni, S, Pb por lo que se atribuye a la quema de combustibles. El factor 3 es atribuido al desgaste de la corteza terrestre por lo que está constituido por Ca, Ti y Fe.

### *Análisis de los Puntajes de los Factores Fundamentales*

La variación temporal de los puntajes de los factores (figura 7), permitió detectar que el factor 1 (industria) presenta un valor máximo el 14 de enero; las condiciones registradas durante el día persistieron durante la noche de este día, las posibles causas de este episodio ya fueron explicadas anteriormente. El factor 2 (combustibles) presenta un máximo el día 13 de diciembre, este día corresponde a vientos del sureste y velocidades bajas. El factor 3 (corteza) presenta un máximo el 17 de diciembre, día en el que se registró la velocidad del viento máxima del período.

## 4.2 Partícula gruesa, $PM_{15}$

En este tamaño de partícula se determinaron 12 elementos S, Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Zn, Sr y Pb. Los elementos de origen antropogénico presentan valores de concentración bajos en partícula gruesa como puede observarse en la figura 3.1. Los elementos de origen natural son los que predominan en este tamaño de partícula, esto puede observarse en las Tablas 3.3 y 3.4, así como en la figura 3.1 y 3.3.

### *Análisis de Factores de Enriquecimiento*

La separación de la componente antropogénica de la natural fue también llevada a cabo a través del cálculo de factores de enriquecimiento para este tamaño de partícula.

Los resultados de este análisis se muestran en la figura 3.5. Los elementos que se presentaron de forma inconsistente S, Cl, V, Ni, Zn, Sr y Pb tienen un origen antropogénico ( $FE > 10$ ). El Calcio, elemento de origen natural, presenta un valor ligeramente mayor a 10 esto es debido a la extracción de piedra caliza que se realiza en las inmediaciones del sitio de muestreo. K, Ti, Mn y Fe son elementos de origen natural.

### *Análisis de Factores Fundamentales*

El análisis de factores se realizó considerando únicamente a los elementos que se presentaron de una manera continua, (K, Ca, Ti, Fe, Zn). Las matrices de correlación son dadas en las tablas 3.8 y 3.9 para día y noche respectivamente. Los elementos que presentaron una correlación lineal durante el día, fueron por una parte Ca, Ti y Fe provenientes de la corteza terrestre y por otra parte K y Zn cuya fuente no ha sido del todo establecida. Durante la noche el K correlaciona con los otros elementos, mientras que el Zn no correlaciona con ningún elemento.

A partir de la tabla 3.12 se observa que para partícula gruesa durante el día los elementos se agruparon en 2 factores, un factor 1 atribuido al desgaste de la corteza terrestre y constituido por Ca, Ti y Fe y un factor 2 constituido por Zn y K, atribuido a la industria (ver tabla 3.16). Durante la noche se determinaron el mismo número de factores (tabla 3.13) con la variante de que el K se localiza en el factor de la corteza y el Zn conforma el factor 2 de la industria (tabla 3.17).

# Capítulo V

S  
E  
S  
I  
O  
N  
E  
S  
U  
N  
I  
F  
I  
C  
A  
D  
O  
S

### 5. 1 Conclusiones

La materia particulada en su modo fino ( $PM_{2.5}$ ) presenta elementos tóxicos en concentraciones más altas que en el modo grueso ( $PM_{10}$ ) tanto para el día como para la noche. Este tamaño de partícula debería ser más ampliamente estudiado para llegar a establecer su norma correspondiente.

Las concentraciones obtenidas para el período de la noche fueron, en algunos casos, superiores a las obtenidas durante el día. Este hecho se presentó cuando las velocidades del viento registradas durante el período nocturno fueron menores a aquellas registradas durante el período diurno por lo que se dificultó la dispersión de los contaminantes.

La contaminación por materia particulada en la zona noroeste de la ciudad de Monterrey, durante el período de muestreo fue debida a 3 fuentes principales:

1. Combustibles
2. Industria metal - mecánica
3. Corteza terrestre

1. Combustibles: S, V, Ni y Pb son elementos provenientes de la quema de combustibles.

2. Industria: Cu, Zn y Mn son elementos provenientes de la industria metal-mecánica.

3. Corteza terrestre: K, Ca, Ti, Fe son elementos provenientes de polvos de la corteza terrestre. El Fe presente en el modo fino proviene también en parte de la industria del acero.

El Sr fue detectado solamente en el modo grueso, en muy pocas muestras, su aparición coincide con días en los que hubo quema de fuegos pirotécnicos, una de las fuentes de este elemento<sup>36</sup>.

El Cloro se presentó en algunas muestras en partícula fina durante día y noche, y en partícula gruesa durante la noche. Su presencia no ha sido aún del todo entendida, sin embargo se sabe que el HCl es usado en diversas industrias, por ejemplo la industria del acero, por lo cual puede pensarse que su presencia en la atmósfera es debida a actividades antropogénicas.

Los elementos correlacionados en partícula gruesa K, Ca, Ti y Fe son provenientes de la corteza terrestre. En Monterrey existen plantas extractoras de piedra caliza, una de las materias primas de la industria vidriera, cementera y cerámica de la ciudad. Los procesos bajo los cuales se realiza la extracción dan origen principalmente a partículas gruesas (PM<sub>10</sub>).

El tratamiento de los datos permitió sugerir las fuentes de emisión para los contaminantes detectados en este trabajo. El cálculo de FE permitió diferenciar a los elementos provenientes de fuentes naturales, de aquellos provenientes de fuentes antropogénicas. El análisis de factores complementó la información obtenida del cálculo de FE ya que es una técnica más poderosa que éste ya que establece grupos de elementos que se correlacionan entre sí y en consecuencia provienen de la misma fuente. De acuerdo al conocimiento que se tiene de las emisiones de los procesos industriales, de los procesos de combustión y de los generados por la corteza terrestre se propusieron las fuentes para los diferentes grupos.

## *5.2 Recomendaciones*

Es importante realizar más estudios sobre la contaminación de materia particulada en sus modos fino y grueso para conocer más sobre este tipo de contaminante. Los estudios posteriores deben ser realizados en base a la elección de una estrategia de muestreo que permita alcanzar los objetivos planteados. Es importante considerar los fines de semana ya que son días clave en este tipo de estudio pues aportan información sobre los patrones de contaminación de los días en los que las actividades humanas se ven disminuidas.



Es importante también recalcar la importancia de contar con más sitios de monitoreo e incluir dentro del análisis multivariado, parámetros meteorológicos tales como temperatura, presión, velocidad y dirección del viento, visibilidad, humedad relativa, etc. con esto se explotará todo el potencial que el análisis multivariado ofrece dentro del campo de contaminación atmosférica e incrementara el conocimiento sobre el comportamiento de la atmósfera del sitio bajo estudio.

B  
I  
B  
L  
I  
O  
G  
R  
A  
F  
Í  
A

Capítulo VI

## *Bibliografía*

1. A.C. Stern, ed. *Air Pollution*. Vol. 1, 2da. ed. Nueva York, Academic Press, 1968.
2. Wark and Warner, *Contaminación del Aire, Origen y Control*, 4ta. ed., Ed. Limusa, 1997.
3. *Handbook of Air Pollution*. Publicaciones PHS AP44 IPB 190-247, 1968.
4. OIEA, Boletín Revista Trimestral del Organismo Internacional de Energía Atómica, Vol. 38, No. 2 (1996) 16.
5. Ernest Merian, *Metals and their compounds in the Environment*, 1a. ed. VCA Publisher INC, 1991.
6. OAQPS. National Air Quality and Emissions Trends Report, 1996.  
<http://www.epa.gov/oar/aqtrnd96/trendsfs.html>
7. EPA. Regulating Smog and Particle Air Pollution An Integrate Approach.  
<http://www.epa.gov/oar/oaqps/regusmog/infpact.html>.
8. OAR Publications. Air Cuality Trends, 1994.  
<http://www.epa.gov/airprogm/oar/aqtrnd95/pm10.html>
9. *Contaminación Atmosférica*.  
<http://www.calidad-del-aire.gob.mx/sima/ddf/contamin.html>

10. Peter Brimblecombe, "Air Composition and Chemistry", 2da. ed. Cambridge University Press, 1986.
11. Sven A. E. Johansson, *Mundo Científico* No. 705 Vol 10, 878, 1984.
12. Sven A. E. Johansson and John L. Campbell, *PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis*. Edit John Wiley & Sons.
13. T.B. Johansson, R. Akelson and S. A. Johansson, *Nucl. Instr. and Meth.* 84 (1970) 141.
14. Fin Folkman, *J. Phys. E.S.* 8, (1975) 429.
15. Celia Henry, *Analytical Chemistry News & Features*, Julio 1 (1998) 462A.
16. Fed. Regist. 1997, 62, 38651-152
17. F. Aldape; J. Flores M. and R.V. Díaz, *International Journal of PIXE* 1 (1991) 355.
18. F. Aldape; J. Flores M. and R.V. Díaz, *International Journal of PIXE* 1 (1991) 373.
19. J. Flores; F. Aldape; R.V. Díaz and D. Crumpton, *Nucl. Instr, and Meth.* B75 (1993) 116.
20. F. Aldape; J. Flores M; R.V. Díaz and D. Crumpton, *Nucl. Instr. and Meth.* B75 (1993) 304.

21. F. Aldape ; J. FloresM ; R.V. Díaz and D. Crumpton, *Nucl. Instr. and Meth.* B109/110 (1996) 459.
22. F. Aldape ; J. FloresM ; R.V. Díaz and D. Crumpton, *Nucl. Instr. and Meth.* B109/110 (1996) 102.
23. Boletín Informativo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), Noviembre de 1997.
24. "Sampling and Analytical Methodologies for Instrumental Neutron Activation Analysis of Airborne Particulate Matter". Training Course Series No.4 International Atomic Energy Agency, 1992.
25. V. A. Marple and K. Willeke, *Atmospheric Environment* 10 (1976) 891.
26. T. A. Cahill; L.L. ashbaugh; J.B. Barone; R.A. Eldred, P.J.Feeney; R.G. Flocchini and C. Goodart, *J. Air Poll. Contr. Ass.* 27 (1977) 675.
27. Phillip K. Hope; Ying Xie; Taisto Raunemaa; Steven Biegalski; Sheldon Landsberger; Willi Maenhaut; Paulo Artaxo; David Cohen, submitted to *Aerosols Science & Technology*.
28. V. Valckovic, *Contemp. Phys*, Vol. 14 No. 5 (1973) 415.
29. Md. Rashiduzzaman Khan, Dennis Crumpton, *CRC Critical Reviews in analytical Chemistry*, Mayo (1981) 103.

30. Van Grieken, Markowicz R. E. *Handbook of X-ray espectrometry* Vol. 14 (1993)
31. *Handbook of X-ray Spectrometry (Methods and Techniques). Spectrum Evaluation*, Pierre J. M. Van Espen and Kohen H. A. Janssens. Univ of Antwerp, Belgium. Edit Van Grieken and Markowics.
32. MAESTRO II, A64-BI. Version 1.11 Distributed by EG&ORTEC.
33. AXIL X-Ray Analysis Software. Version V3.0 Distributed by CANBERRA PACKARD, BENELUX.
34. Douglas R. Lawson and John W. Winchester, *Atmospheric Environment* Vol. 13 (1979) 925.
35. J. Mulhbaier Dasch and g.T. Wolff, *Water Air and Soil Pollution*, 43 (1989) 401.
36. *Handbook of Chem. and Phys.* 57<sup>th</sup> edition, CRC Press, (1976-1977).
37. Tomas A. Cahill, Robert A. Eldred, Robert G. Flochini and John Barone. *Nucl. Instr. and Meth.* 142 (1977) 259.
38. George D. Thurston and John D. Spengler. *Atmospheric Environment* Vol. 19, No. 1 (1985) 9.
39. Paulo Artaxo, Fátima Andrade and Willi Maenhaut, *Nucl. Instr. and Meth.*, B49 (1990) 383.

40. Philip K. Hopke, Ernest S. Gladney, Glen E. Gordon and Willian H. Zdler and Alung G. Jones. *Atmospheric Environment*, 10 (1976) 105.
41. Daniel J. Alpert and Philip K. Hopke, *Atmospheric Environment*, Vol. 15 No. 5 (1981) 675.
42. Irving H. Blifford, J.R. and Gary O. Meeker. *Atmospheric Environment*, 1 (1967) 147
43. Jorge de la Garza García. *Análisis de la Información Mercadológica a través de la Estadística Multivariante*. 1a. ed. Alhambra Mexicana. 1995
44. Miller y Miller. *Estadística para Química Analítica*, 2da ed. Adison Wesley Iberoamericana. 1993.
45. Case, A., Garreson G., Wiewioroski, E. Ten Years of Catalyst Recycling a Step to the Future, AMAX Metals Recovery, Inc. & CRI-MET; <http://www.cri-met.com>.
46. Inventario de Emisiones. *Sistema Integral de Monitoreo Ambiental*. 1996
47. Banco de datos. *Sistema Integral de Monitoreo Ambiental*. Diciembre 96 - Enero 97.
48. Juan Manuel Alfaro Barbosa. Tesis Doctoral. Hamburgo. 1995.

