



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

FACULTAD DE QUIMICA

DETERMINACIÓN DE IONES INORGÁNICOS EN  
AEROSOL, MENORES O IGUALES A 10 MICRAS (PM<sub>10</sub>)

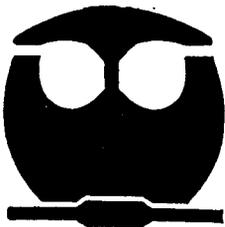
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**Q U Í M I C A**

P R E S E N T A :

**ROSALBA RODRÍGUEZ PAREDES**



MÉXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

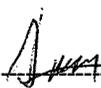
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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	Prof. Pedro Villanueva González
Vocal	Profra. Lucia Hernández Garciadiego
Secretario	M.I. Armando Báez Pedrajo
1er suplente	Profra. Araceli Patricia Peña Álvarez
2do suplente	Prof. Luis Antonio Ortiz Frade

Sitio donde se desarrollo el tema:  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

  
-----  
Asesor  
M.I. Armando Báez Pedrajo

  
-----  
Supervisor técnico  
Q.F.B. María del Carmen Torres Barrera

  
-----  
Sustentante  
Rosalba Rodríguez Paredes

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por haberme permitido ser profesionista.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Al laboratorio de Química Atmosférica.

Por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

A la Facultad de Química.

Al Instituto de Química.

Por todos los conocimientos adquiridos en ambas instituciones.

Al M.I. Armando Báez Pedrajo, Jefe del Laboratorio de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por su asesoría y haberme permitido usar el equipo necesario para la realización de este trabajo.

A la Q. María del Carmen Torres B. y al Dr. Hugo Pascual Padilla G., por su importante aportación a este trabajo, por haberme capacitado en el manejo del equipo de cromatografía de líquidos, así como por la supervisión durante el análisis de las muestras.

A la M.C Rocío García M. y al Ing. Raúl Belmont D., por su importante asesoría, en el uso del equipo de absorción atómica, así como por la supervisión durante el análisis de las muestras.

Agradezco a los profesores Lucia Hernández G. y Pedro Villanueva G., por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

## DEDICATORIA

A mis padres.

Por darme todo su apoyo, por todos sus esfuerzos y porque sé que gracias a sus bendiciones he logrado llegar hasta este momento.

Especialmente a mis hermanos Fernando y Carmen.

Por su apoyo incondicional porque sin su ayuda no hubiera logrado llegar hasta este momento. Gracias por su confianza.

A mis hermanos: José, Ricardo y Luciano por toda su ayuda.

A mis sobrinos: Paulina y Diego.

A Paulina Rubí, para que muy pronto logre llegar hasta este momento y que siempre contará con mi apoyo.

A la Q. Maria del Carmen Torres B; por su paciencia, su ayuda, su disposición para la revisión de este trabajo, por su amistad y por la gran confianza brindada.

A la M.C. Rocío García M; por brindarme su ayuda, su confianza y su amistad, por sus atinados comentarios y por su buena disposición hacia este trabajo.

Al Ing. Raúl Belmont; por su amabilidad y disposición para ayudarme en cualquier momento.

Al M.I. Armando Báez Pedrajo; por su amabilidad, su paciencia y sus pláticas tan agradables.

A la maestra Mercedes Meijueiro M; gracias por sus enseñanzas y por su amistad.

A mis tíos, mis primos y mis sobrinos.

A mi abuelo Rosalío y a la memoria de los demás.

A mis amigos: Edith Mendoza V; Elizabeth Hernández M; Olivia Rincón; Antonieta Olguín M; Isabel Alvarado C; Cristina Fonseca; Victorino Ortega; Alfredo Flores S; Norma Gaytán; Mayra; Liliana; Carmen Romero; Joaquín, Eugenia Josefina, Esteban, Michel; Roberto Gaspariano L; German; Maribel Serrano R; Martha Laura Duran R; Norma Rojas C; Patricia Torralva; Ariel Sol Olvera R; José Mendoza; Nora Aguilar; Marcela; Flor; Areli; Miriam; Adriana Cuellar; Sara Berumen; Bety Martínez.

A todos mis profesores, especialmente a los que también son mis amigos: Mercedes Meijueiro M; al profesor Baldomero, al profesor Pedro Villanueva G; al Dr. Héctor Barrios L; al Dr. Federico del Río y la maestra Consuelo Sandoval. Gracias por su amistad, por transmitirme sus conocimientos y por su apoyo brindado.

Al señor Calixto Cuevas por todas sus atenciones.

A la memoria de mi hermana Gabriela, de Anni Carol Rojas y Fabián Urbina.

**GRACIAS, LOS QUIERO MUCHO A TODOS.**

## ÍNDICE

Contenido	Página
Introducción	1
Objetivos	2
Hipótesis	3
CAPÍTULO I Antecedentes	4
1.1 Contaminación atmosférica	4
1.2 Contaminación en la Ciudad de México	4
1.2.1 Orografía en el Valle de México	5
1.2.2 Clima, precipitaciones y vientos en el Valle de México	6
1.2.3 Inversiones térmicas en el Valle de México	7
1.2.4 Radiación solar en el Valle de México	8
1.2.5 Vegetación y ecosistemas en el Valle de México	9
1.3 Aerosoles en la atmósfera	9
1.4 Propiedades físicas y químicas de los aerosoles	11
1.5 Cambio climático y aerosoles	12
1.6 Efectos de los aerosoles en la salud	13
1.7 Fuentes de emisión de los iones inorgánicos estudiados	13
1.8 Técnicas analíticas utilizadas	19
1.8.1 Cromatografía	19
1.8.2 Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC)	21
1.8.3 Cromatografía de intercambio iónico	22
1.8.4 Espectroscopía de Absorción Atómica con atomización en flama	22
CAPÍTULO II Desarrollo experimental	24
2.1 Equipos	24
2.1.1 MOUDI (Microorifice Uniform Deposit Impactor)	24
2.1.2 Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución	26
2.1.3 Espectrofotómetro de Absorción Atómica	29
2.2 Sitio de muestreo	31

2.3 Limpieza de material	32
2.4 Reactivos	33
2.5 Tratamiento de las muestras	33
2.6 Análisis de las muestras	34
2.6.1 Determinación de cationes por HPLC	34
2.6.2 Determinación de aniones por HPLC	34
2.6.3 Determinación de calcio y magnesio por Espectroscopía de Absorción Atómica (E.A.A)	35
2.7 Disoluciones estándar	35
2.8 Disoluciones	36
2.9 Preparación de gráficas de calibración	36
CAPÍTULO III Resultados y discusión	55
3.1 Tratamiento de los datos	55
Conclusiones	73
Bibliografía	75

## INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), es una de las áreas urbanas más grandes del mundo, con una población de más de 20 millones de habitantes, su situación geográfica consiste de una cuenca cerrada con una altitud de 2240 metros sobre el nivel del mar, rodeada al sur-sureste de una cordillera montañosa con picos de más de 3000 metros sobre el nivel del mar. La región se caracteriza por un alto porcentaje de industrias localizadas al nor-noreste del valle (alrededor de 30000, pequeñas, medianas y grandes industrias), hay más de 3.5 millones de automóviles, además de vehículos de transporte público y de carga, lo mencionado anteriormente, ha originado uno de los problemas más grandes: la contaminación ambiental.

Para una comprensión adecuada del problema, se requiere estudiar apropiadamente los contaminantes atmosféricos. Entre los principales contaminantes se encuentran los aerosoles atmosféricos.

Los aerosoles atmosféricos se definen como partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas, estos pueden ser de origen natural o antropogénico.

El conocimiento de la composición química de estos aerosoles es muy importante porque tienen efectos adversos sobre la salud, reducen la visibilidad, causan lluvia ácida que daña los edificios y monumentos, también son formadores de núcleos de condensación (formadores de nubes).

En la actualidad, existe la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que hace mediciones de la concentración de los contaminantes en la ZMCM, sin embargo, los contaminantes que estudia dicha red, se limitan principalmente a gases y en el caso de las partículas suspendidas (aerosoles atmosféricos), se refiere únicamente a la concentración de masa total presente en el aire.

En esta tesis se llevó a cabo el análisis para identificar los siguientes iones inorgánicos: cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), existentes en partículas  $\text{PM}_{10}$ . Para el muestreo de los aerosoles, se empleó un impactor de partículas de deposición uniforme (MOUDI, por sus siglas en inglés Micro Orifice Uniform Deposit Impactor).

Las técnicas utilizadas para el análisis de los iones fueron: Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC por sus siglas en inglés, High Performance Liquid Chromatography), para sulfatos, nitratos, cloruros, sodio, amonio y potasio. Para calcio y magnesio se utilizó Espectrofotometría de Absorción Atómica (flama).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos, primero de acuerdo al diámetro aerodinámico que tienen estos aerosoles y segundo de acuerdo a su composición química. Por otro lado, se discute el posible origen de estos aerosoles.

### **Objetivos**

- Determinar los iones inorgánicos: sulfatos, nitratos, cloruros, sodio, amonio, potasio, calcio y magnesio, en cada una de las 8 etapas del muestreador MOUDI, mediante los métodos de Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución y Espectrofotometría de Absorción Atómica (flama).
- Analizar las variaciones de las concentraciones de los diferentes iones, en función de su diámetro aerodinámico.

## **Hipótesis**

- Debido al origen de los diferentes iones analizados, esperamos encontrar en mayor cantidad sulfatos, nitratos, amonio y potasio.
- Con respecto al tamaño de diámetros aerodinámicos (en micrómetros), con que cuenta el MOUDI, esperamos encontrar la mayoría de estas partículas en la fracción fina de los aerosoles, debido a los procesos de formación de éstos.

## **CAPÍTULO I ANTECEDENTES**

### **1.1 Contaminación atmosférica**

La contaminación atmosférica consiste en la presencia de materia o energía, en cualquiera de sus estados físicos y formas que, al incorporarse al aire, altera o modifica su composición y condición natural, provocando un desequilibrio ecológico.

En la atmósfera se encuentran presentes en suspensión partículas sólidas y líquidas, de muy diversa composición y tamaño. Entre éstas se encuentran las partículas de origen natural integradas por suelos y partículas de origen biológico, las que provienen de los procesos de combustión y las que se forman en la atmósfera, tales como aerosoles, entre los que se encuentran nitratos y sulfatos.

Es necesario aclarar que las partículas con mayor impacto sobre la salud, e incluso sobre la visibilidad, son las de un tamaño menor a  $10\ \mu\text{m}$ , a las que se les conoce como  $\text{PM}_{10}$  (Materia Particulada). En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el contenido de  $\text{PM}_{10}$  puede representar entre 40 y 60% de las partículas suspendidas totales (Lacy Rodolfo, 1993).

### **1.2 Contaminación en la Ciudad de México**

Son diversas las fuentes que han deteriorado la calidad del aire en el Valle de México. Desde mucho tiempo atrás, la ciudad ha sufrido, con el polvo proveniente de las tolvaneras del lago de Texcoco, que en la actualidad está desecado, así como de otras fuentes naturales de partículas.

En la ciudad existe un número considerable y creciente de procesos de consumo energético y fuentes de emisión de contaminantes, que incluye a diferentes sistemas y medios de transporte, actividades industriales y áreas ecológicamente degradadas, que aportan polvos y partículas en suspensión (Gordillo H. David, 1998).

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se tienen identificadas 30124 industrias, de las cuales 72% se localizan en el D.F. y 28% en los municipios conurbados. Solamente 2% (602 establecimientos) corresponden a industrias grandes; 3% (904) a industrias medianas, 20% (6025) a pequeñas industrias y 75% (21187) a microindustrias.

Las industrias más numerosas son: la alimentaria, la metal-mecánica, la automotriz, la cementera, la cerámica, la textil y la papelera, entre otras.

La mayor densidad de establecimientos industriales se presenta en el norte y oriente del área urbana, desde donde provienen los vientos dominantes.

El número de establecimientos comerciales y de servicios, se incrementa continuamente; existen aproximadamente 12500 establecimientos de servicio con procesos contaminantes, entre los que figuran baños públicos, hoteles, deportivos, balnearios, restaurantes, tintorerías, panaderías, molinos, tortillerías, autos privados, taxis, microbuses y transporte urbano.

El efecto combinado de las emisiones contaminantes, provenientes de la industria, el transporte, otros servicios y actividades, afectan la calidad del aire (Gordillo H. David, 1998). Las características físicas, especialmente las orográficas y climáticas del Valle de México, son determinantes para la dispersión y transformación de los contaminantes en el aire.

### **1.2.1 Orografía en el Valle de México**

El Valle de México se ubica alrededor de 2240 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por ser una cuenca lacustre, cerrada por grandes cadenas montañosas de origen volcánico.

Al oriente y a una distancia de 25 kilómetros del centro de la ciudad, el valle está limitado por la sierra nevada, donde sobresalen los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, con alturas superiores a los 5200 metros. Estos se han constituido en el valor paisajístico por excelencia del Valle de México y su visión es el símbolo inequívoco y popular de un aire limpio y transparente.

Al poniente, la sierra de las Cruces separa al Valle de México del Valle de Toluca, con montañas que alcanzan los 3000 metros de altura. Al sur, las serranías del cerro del Ajusco y el Chichinautzin, de formación geológica reciente, cierran el valle con prominencias que alcanzan los 4000 metros. Entre la sierra del Chichinautzin y la sierra Nevada, se ubica el llamado Sifón de Yautepec, cuya topografía no es tan accidentada y permite ocasionalmente el paso de los vientos provenientes del norte, hacia el Valle de Cuautla.

En el interior del valle, las sierras de Guadalupe en el norte y la de Santa Catarina en el oriente, actualmente rodeadas por la mancha urbana, conforman el núcleo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en una microcuenca atmosférica e hidrológica de características ecológicas únicas (Lacy Rodolfo, 1993).

### **1.2.2 Clima, precipitaciones y vientos en el Valle de México**

En general, el Valle de México y su área ecológica de influencia que incluye las sierras, gozan de un clima templado, con precipitaciones anuales superiores a los 700 mm en las zonas montañosas del sur y temperaturas medias que oscilan entre 10 y 23 grados centígrados.

El área donde se ubicaba el antiguo lago de Texcoco posee un clima seco estepario, influido por la apertura oriente del valle, en dirección hacia los grandes llanos de Apan,

en el estado de Hidalgo. En esta porción del valle, la precipitación no supera los 532 mm anuales y las temperaturas alcanzan en verano hasta los 35 grados centígrados.

En general, la época de lluvia se inicia en mayo y termina en octubre, aunque es en los meses de junio, julio y agosto cuando se presentan precipitaciones intensas y casi diarias, que contribuyen a la limpieza de la atmósfera.

A través del día y durante todo el año, los vientos dominantes provienen del noreste, con velocidades medias superficiales del orden de 2 m/s; durante la noche, los vientos fríos de las montañas descienden hacia el valle.

En la época de secas, durante los primeros meses del año, fuertes vientos vespertinos provenientes del noreste, acarrear partículas de las áreas desprovistas de vegetación y de pavimento, provocando tolvaneras locales. En esta misma época, vientos del norte y ocasionalmente del sur, limpian la atmósfera a medio día, estableciéndose condiciones de excelente visibilidad. La extensión de la mancha urbana y el consumo de energéticos que se realiza en su interior, han modificado sensiblemente el microclima del valle. Actualmente, las islas de calor de la ciudad marcan diferencias de hasta 12 grados centígrados entre la ciudad, las áreas suburbanas y rurales de la periferia. Este fenómeno provoca movimientos ascendentes de aire contaminado en el centro del valle, mismo que tiene la oportunidad de dispersarse o descender en los alrededores inmediatos de la ciudad (Jáuregui, 2000).

### **1.2.3 Inversiones térmicas en el Valle de México**

Como fenómeno meteorológico, las inversiones térmicas en el Valle de México, tienen una especial relevancia en la concentración de contaminantes en el aire. Éstas ocurren durante las primeras horas del día, en donde una masa de aire frío superficial queda

atrapada por una masa de aire caliente en las alturas, provocando la acumulación de los contaminantes emitidos durante la noche anterior y los arrojados por las actividades matutinas de la población e industrias de la ciudad.

Las inversiones térmicas se presentan en todos los meses del año, sin embargo, su frecuencia de ocurrencia y duración, es mayor en los meses invernales.

Frecuentemente y en particular, durante la época invernal, las inversiones térmicas coinciden con otros fenómenos meteorológicos, tales como los sistemas de alta presión. Éstos limitan aún más la escasa dispersión de los contaminantes y se encuentran relacionados con la presencia de aire polar sobre el territorio nacional (Jáuregui, 2000).

En la época invernal, las inversiones térmicas se rompen generalmente alrededor de las diez de la mañana por acción del sol, el cual calienta el aire superficial de la ciudad, provocando un movimiento ascendente, que permite así la dispersión de los contaminantes (Jáuregui, 2000).

#### **1.2.4 Radiación solar en el Valle de México**

La radiación solar es el factor que desencadena las múltiples y complejas reacciones entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, dando lugar al ozono. Dada la importancia del sol en este proceso, a este tipo de reacciones se les conoce como fotoquímicas.

La alta radiación solar que caracteriza al Valle de México, por su altura sobre el nivel del mar, propicia que nuestra atmósfera tenga una mayor reactividad fotoquímica que la de otras ciudades localizadas en latitudes más al norte. Por ejemplo, comparada con los Ángeles California, la atmósfera de la ZMCM es aproximadamente 60% más reactiva.

En el Valle de México, se recibe la mayor radiación solar en los meses de diciembre a febrero. En el resto del año y durante la época de lluvias, la nubosidad bloquea el paso del sol, aunque esto no impide que al mediodía y con nubes dispersas, la radiación solar sea suficiente para la formación de compuestos fotoquímicos (Jáuregui, 2000).

### **1.2.5 Vegetación y ecosistemas en el Valle de México**

La calidad del aire se ve favorecida por la presencia de vegetación, ya que ésta amortigua los efectos de los contaminantes y evita la erosión eólica del suelo.

En el Valle de México y su área ecológica de influencia, la expansión de la mancha urbana y las actividades productivas, han causado la transformación profunda del paisaje, así como la desaparición del 73% de los bosques y el deterioro de diversos ecosistemas, que en otros tiempos constituían importantes pastizales, áreas agrícolas, lagos y ríos. El 99% de los antiguos lagos del Valle de México han desaparecido, quedando sólo reminiscencias de los mismos, en lo que hoy son los lagos de Texcoco, Xochimilco, Zumpango y Chalco. De hecho, la desecación de los lagos y en especial el de Texcoco, trajo como consecuencia el más antiguo problema de contaminación atmosférica de la ZMCM: las tolvaneras, que durante décadas azotaron a la ciudad, afectando la salud de sus habitantes. Hoy en día, y después de un esfuerzo de 15 años, la restauración ecológica del exvaso del lago de Texcoco es una realidad exitosa y las tolvaneras de esa parte del valle, han disminuído notablemente (Lacy Rodolfo, 1993).

### **1.3 Aerosoles en la atmósfera**

Los aerosoles atmosféricos se definen como partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas, éstos son de origen natural y antropogénico. Una clasificación general divide

a los aerosoles en primarios y secundarios; los primarios son producto de emisiones directas de partículas a la atmósfera por actividades antropogénicas (procesos industriales, prácticas de uso de suelo, procesos urbanos, etc.) y procesos naturales (emisiones de cenizas volcánicas, sal de mar, erosión de suelos, etc.); los secundarios, se producen en la atmósfera, mediante reacciones químicas involucrando precursores en fase gaseosa (Seinfeld y Pandis, 1998).

Entender los procesos de formación de los aerosoles secundarios es de gran importancia, pues la mayoría de los contaminantes emitidos a la atmósfera por actividades del hombre, son precursores de este tipo de aerosoles. Los procesos que están involucrados en su formación son: nucleación y coagulación.

La nucleación es la condensación de especies con baja presión de vapor, para formar una nueva partícula, se consideran dos clases: nucleación homogénea que ocurre cuando los gases forman la partícula sin ayuda de una superficie existente y nucleación heterogénea cuando los gases forman el aerosol en una superficie previa a la partícula (Jacobson, 2002).

La coagulación por su parte se lleva a cabo cuando dos partículas chocan y se quedan adheridas una a la otra (coalescencia). Este proceso afecta principalmente a las partículas más pequeñas.

Para el estudio de los aerosoles no solamente es importante el proceso de su formación y composición, sino también el tiempo de residencia del aerosol en la atmósfera, que varía desde algunos días hasta varias semanas, así como los mecanismos de remoción del aerosol, como son: deposición en la superficie de la tierra (deposición seca) e incorporación dentro de las nubes durante la formación de precipitación (deposición húmeda). (Seinfeld y Pandis, 1998).

#### 1.4 Propiedades físicas y químicas de los aerosoles

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los aerosoles permite entender su comportamiento cuando se encuentran presentes en la atmósfera; entre las de mayor importancia y que han sido más estudiadas se encuentran la composición química y la distribución de tamaño, que indican la variación de concentración con respecto al tamaño de la partícula (diámetro aerodinámico). El diámetro aerodinámico se define como el diámetro de una esfera de densidad unitaria ( $\delta=1 \text{ gcm}^{-3}$ ), que posee la misma velocidad terminal de la partícula. Esta distribución de tamaño se divide en modos:

Modo de condensación (diámetro aerodinámico desde unos nanómetros hasta  $0.1 \mu\text{m}$  [Seinfeld y Pandis, 1998]): contiene partículas de reciente emisión o formadas por procesos de nucleación homogénea o heterogénea, directamente de la fase gaseosa. (Jacobson, 2002).

Modo de acumulación (diámetro aerodinámico desde  $0.1$  a  $2.5 \mu\text{m}$  [Seinfeld y Pandis, 1998]): el crecimiento de las partículas y el proceso de coagulación hacen que los aerosoles se presenten en este modo. Son las que más influyen en la interacción con la radiación.

Modo grueso (diámetro aerodinámico mayor que  $2.5 \mu\text{m}$  [Seinfeld y Pandis, 1998]).

Son formadas por procesos mecánicos, cuyo origen es tanto natural (polvo arrastrado por el viento, aerosoles formados en el mar, emisiones volcánicas, etc.) como antropogénico.

Las especies químicas que comúnmente conforman a los aerosoles atmosféricos, con diámetro aerodinámico entre  $0.01$  y  $10 \mu\text{m}$ , son nitratos, sulfatos, amonio, carbono, especies crustales, sal de mar y agua. Los compuestos inorgánicos (nitratos, sulfatos y

amonio), son generalmente secundarios, formados de sus precursores en fase gas  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$ .

En general, las partículas menores que  $2.5 \mu\text{m}$  de diámetro, son conocidas como partículas finas, mientras que las mayores que  $2.5 \mu\text{m}$  de diámetro, se denominan partículas grandes o gruesas (Seinfeld y Pandis, 1998). En la fracción gruesa, el polvo suspendido es una fuente importante de partículas y elementos crustales como calcio, magnesio, aluminio, sílice, hierro y potasio, son especies abundantes. Por otro lado, el sulfato, nitrato y amonio están presentes en ambos tamaños.

### **1.5 Cambio climático y aerosoles**

Los efectos que tienen las partículas sobre el clima son diversos y dependen de su composición y tamaño. Los principales efectos de los aerosoles con respecto al cambio climático, se relacionan con su interacción con la radiación solar, en donde los aerosoles mediante los procesos de absorción, dispersión y/o formación de nubes, afectan la temperatura del planeta, ya que la atmósfera de la tierra mantiene su equilibrio térmico mediante los intercambios de la energía incidente y la energía irradiada. Los aerosoles pueden alterar este equilibrio mediante ciertos procesos basados en principios físicos como:

**Dispersión.** Ocurre cuando la radiación incidente es difundida por los aerosoles presentes en la atmósfera. En la dispersión no hay absorción permanente de energía y es función de la longitud de onda y del tamaño de las partículas.

Cuando sucede este proceso la temperatura en la tierra tiende a disminuir.

**Absorción.** Se lleva a cabo cuando los aerosoles absorben la energía, provocando el aumento de la temperatura superficial.

**Formación de nubes.** Los aerosoles actúan como núcleos de condensación de gotas de agua y cristales de hielo, así las características de las nubes también dependerán de las propiedades físicas y químicas de las partículas.

Por otro lado, los aerosoles emitidos al ambiente, no solamente afectan la región donde son producidos, sino que también provocan cambios en otras zonas del planeta, debido a que dichos contaminantes son transportados a través de la atmósfera por corrientes de aire. Estos aerosoles, en otras regiones del planeta, interaccionan con la radiación solar y pueden contribuir al cambio climático global (Charlson et al., 1992).

### **1.6 Efectos de los aerosoles en la salud**

Generalmente las partículas con un diámetro menor o igual a 10  $\mu\text{m}$ , son las que penetran al tracto respiratorio.

Hay diferentes razones generales que explican por qué las partículas finas son más dañinas para la salud humana, debido a que éstas tardan más tiempo en sedimentar y la exposición a ellas por vía de inhalación aumenta. También las partículas finas, al ser inhaladas, viajan a los pulmones (por lo cual se denominan respirables) y pueden adsorberse sobre la superficie de las células y en consecuencia, afectar a nuestra salud (Rico; 2001).

Algunas partículas llegan a los alvéolos como ocurre con las de tamaños inferiores a 1.0  $\mu\text{m}$ , de aquí que sean elevados los potenciales efectos dañinos a la salud humana (Rico; 2001).

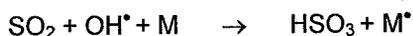
### **1.7 Fuentes de emisión de los iones inorgánicos estudiados**

**Sulfatos.** La identificación de las fuentes de sulfatos es importante para entender el proceso responsable de la composición y distribución de tamaño de los iones sulfato

encontrados en el material particulado. El sulfato ambiental puede ser tanto de origen primario como secundario. El sulfato primario se refiere a aquel emitido directamente a la atmósfera como sulfato particulado,  $\text{SO}_3$  o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en fase gaseosa, los cuales rápidamente forman núcleos y se condensan para formar partículas. El sulfato secundario se refiere al material formado por la conversión de gas a partícula a través de una reacción química del dióxido de azufre u otros gases que contienen azufre, para formar  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{SO}_4^{2-}$  en disolución. La mayoría del sulfato encontrado en la tropósfera es secundario, formado a partir de dióxido de azufre.

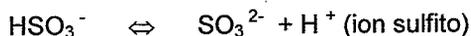
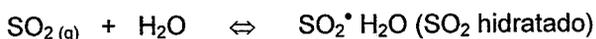
#### **Oxidación del dióxido de azufre en fase gaseosa.**

La oxidación del dióxido de azufre en fase gaseosa ocurre a través de una secuencia de reacciones que se inicia con la reacción entre el  $\text{SO}_2$  con el radical hidroxilo (el cual se forma como resultado de procesos fotoquímicos primarios):



#### **Oxidación del dióxido de azufre en fase líquida.**

La presencia de gotas de agua en la formación de aerosoles, nubes, nieblas y lluvia en la tropósfera, ofrece otra fase en la cual la oxidación del  $\text{SO}_2$  puede ocurrir. Así, el gas de bióxido de azufre se disuelve en agua para establecer los siguientes equilibrios:



Las reacciones en fase acuosa, tienden a ser el mecanismo más importante de la formación de aerosoles sulfatados. Tales reacciones ocurren cuando la humedad relativa es mayor a 75%, mientras que las reacciones en fase gaseosa, que son más lentas, predominan a humedad relativamente más baja. De tal manera que en ausencia de humedad alta, el  $\text{SO}_2$  puede ser transportado eficientemente antes de ser depositado en la superficie, en forma de aerosol o disuelto en gotas de agua de lluvia.

Las fuentes más importantes de las emisiones de  $\text{SO}_2$  que se presentan en la mayoría de las regiones, provienen de la combustión del carbón y del petróleo. Cuando se queman los combustibles fósiles, la mayoría del azufre contenido en ellos, es oxidado para formar el gas del bióxido de azufre.

Las fuentes de emisión de  $\text{SO}_2$  son naturales y antropogénicas.

Algunas fuentes naturales son:

- ◆ Emisión de volcanes.
- ◆ Incendios forestales.

La fuente natural más grande de emisiones de azufre, ocurre en la forma de dimetilsulfuro (DMS), que es generado por la acción microbiana y emitido desde la superficie del océano. Uno de los productos de la oxidación del DMS es el  $\text{SO}_2$ , reconocido como una importante fuente para la formación de los aerosoles de sulfato y de núcleos de condensación.

Las fuentes antropogénicas son:

- ◆ Combustión del petróleo y del carbón mineral (coque).
- ◆ Fundición metálica.
- ◆ Fabricación de ácido sulfúrico.
- ◆ Conversión de la pulpa de madera a papel.

- ◆ Incineración de basura.
- ◆ Producción de azufre elemental.

**Nitratos.** Las fuentes de nitratos en los aerosoles se pueden clasificar como primarias y secundarias. La oxidación atmosférica del dióxido de nitrógeno se produce tanto por reacciones en fase gaseosa como en fase líquida.

**Reacciones en fase gaseosa.**

El mecanismo principal de generación de nitratos en fase gaseosa es la reacción entre el radical hidroxilo y el dióxido de nitrógeno para formar HNO<sub>3</sub>:



**Reacciones en fase líquida.**

Un segundo mecanismo para la formación de ácido nítrico en fase líquida es la siguiente secuencia de reacciones:



Las fuentes para la formación de nitratos son los óxidos de nitrógeno, que son liberados a la atmósfera urbana desde el escape de vehículos motorizados, de la combustión del carbón, petróleo o gas natural y durante procesos tales como la soldadura al arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa. Los óxidos de nitrógeno son usados en la producción de ácido nítrico, lacas, tinturas y otros productos químicos. En áreas rurales, la presencia de óxidos de nitrógeno, se debe a las emisiones que son producto de la desnitrificación microbiana llevada a cabo en suelos y plantas.

Una vez que el ácido nítrico se forma, su reacción con amoníaco en fase gaseosa puede dar origen a la formación de partículas de nitrato de amonio. El ácido nítrico puede reaccionar también con sales de cloruro o carbonato, produciéndose el ácido y el material particulado.

En la figura 1.1 se muestra un diagrama de los procesos de conversión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , a sus respectivos compuestos y cómo interactúan en la tropósfera (Dejo. R. 1972).

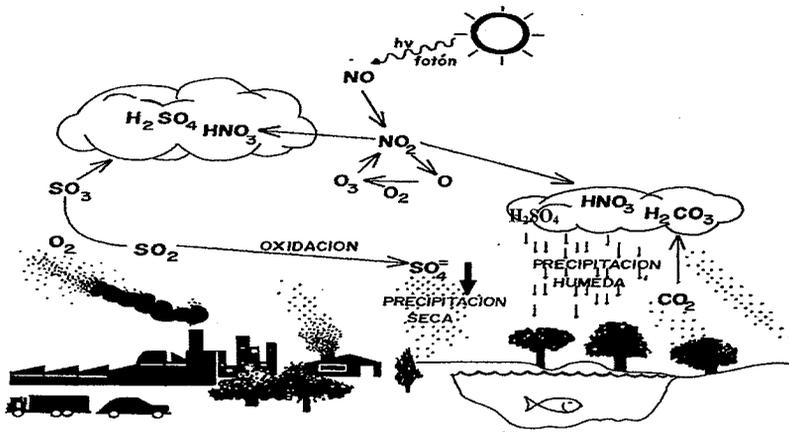


Figura 1.1 Conversión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  a sus respectivos compuestos.

**Cloro.** El cloro se presenta en forma gaseosa y de partículas en la atmósfera no contaminada. Su origen es principalmente, el agua de mar que puede arrastrar el ion cloruro disuelto o como sal sólida, tras la evaporación.

La cantidad de cloro liberada por la industria es poco importante, pero el formado a partir de los gases expulsados por los vehículos de motor, constituye una manifiesta fuente de contaminación. Una posible fuente de  $\text{HCl}$  producida por el hombre, es la combustión de polímeros orgánicos clorados, como por ejemplo, cloruro de polivinilo,

que se queman con los productos sólidos residuales en los vertederos de basura (Spedding J.D; 1981).

Los disolventes clorados se emplean en desengrasado, extracción y componentes de adhesivos, poseen un alto impacto ambiental debido a que son degradados químicamente por la luz ultravioleta (UV), que es componente de la radiación solar. La energía de la luz UV es suficientemente elevada como para romper el enlace carbono – cloro de estos compuestos, proceso fotoquímico que da lugar a radicales libres.

Otras aplicaciones del cloro son: preparación de insecticidas, disolventes, fibras, cauchos especiales y otros productos de la petroquímica, que absorben un 60% de la producción mundial del cloro. Aplicación papelera y textil (como decolorante, por sí mismo o por sus combinaciones, como el clorito sódico) que consume otro 20% del total. Y en menor proporción se usa en la preparación de ácido clorhídrico (HCl), hipocloritos, cloratos, polvos de gas, cloruros metálicos y en la extracción de metales de sus menas o residuos. Los efectos del cloro atmosférico sobre la salud, sólo se manifiestan a concentraciones elevadas producidas en escapes accidentales de gas. Sin embargo, el cloro gaseoso puede afectar a las plantas a concentraciones tan bajas como  $0.2 \text{ mgkg}^{-1}$  (Derek Elsom, 1990).

**Amonio.** El amoniaco  $\text{NH}_3$  (g) es emitido por procesos biológicos en los seres vivos, por el uso de fertilizantes y por el océano. Cuando el amoniaco se disuelve en agua, este se protona con el ion hidrógeno para formar el ion amonio (Jacobson, 2002).



## **Sodio, potasio, calcio y magnesio.**

La fuente para estos iones es principalmente el suelo, por ejemplo el suelo de Ciudad Universitaria esta compuesto principalmente por los siguientes minerales: feldspatos ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  y  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), talco [ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ] y asbesto [ $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], que contienen a estos elementos. (Castellanos, 1991).

La aportación de estos iones por el suelo se lleva a cabo principalmente por las siguientes fuentes: por zonas agrícolas, zonas de agostadero, lechos de antiguos lagos, zonas suburbanas sin pavimentar, la sierra de Guadalupe y de santa Catarina, el valle de Chalco, Tlahuac y el Ajusco (Lacy Rodolfo, 1993).

También existe el cemento como probable fuente de estos iones, ya que éste esta constituido por silicatos y aluminatos cálcicos, la cal por ejemplo está constituida principalmente por  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Es muy probable que otra fuente para el sodio sea el empleo de sales de este ion en la producción de medicamentos y en el sur de la ciudad existe este tipo de industria.

El potasio tiene como principal fuente la quema de biomasa (incendios forestales).

El magnesio tiene además las siguientes fuentes: aleaciones, vidrio, fertilizantes, pirotecnia y refractarios.

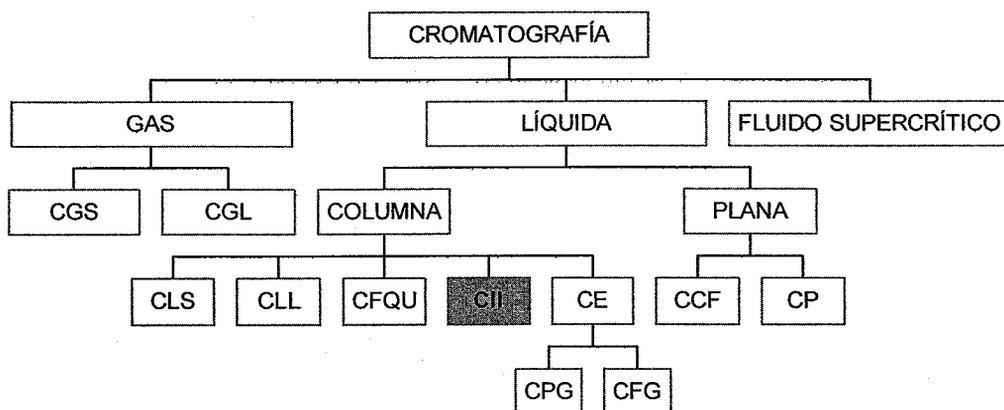
## **1.8 Técnicas analíticas utilizadas**

### **1.8.1 Cromatografía**

La cromatografía es una técnica que permite separar, aislar e identificar los componentes de una mezcla de compuestos químicos. La muestra es distribuida entre dos fases, una estacionaria y otra móvil, de tal forma que cada uno de los componentes de la mezcla son selectivamente retenidos por la fase estacionaria.

La separación se lleva a efecto en una columna tubular cuyo relleno depende de la cromatografía, éste puede actuar como fase estacionaria propiamente dicha o como soporte de una fase estacionaria líquida. También se puede efectuar utilizando como fase estacionaria papel de filtro o un sólido finamente dividido, colocado en forma de capa fina sobre una placa de vidrio. Estos tres tipos de cromatografía se basan en los mismos principios fundamentales y se conocen respectivamente como cromatografía en columna, en papel y de capa fina.

En la cromatografía en columna, la fase móvil puede ser un líquido un gas o un fluido supercrítico según el caso se denominan respectivamente "Cromatografía Líquida", "Cromatografía de Gases" y "Cromatografía de Fluido Supercrítico". Esta fase móvil fluye a través del relleno de la columna, arrastrando los componentes de la mezcla, que son selectivamente retenidos por la fase estacionaria. De acuerdo a la naturaleza de las fases involucradas y con los mecanismos de separación, es posible distinguir diferentes tipos de cromatografía, tal como se indica en la figura 1.2 (Harold M. McNair, 1980).



**Figura 1.2 Métodos cromatográficos.** CGS: Cromatografía Gas - Sólido; CGL: Cromatografía Gas - Líquido; CLS: Cromatografía Líquido - Sólido; CLL: Cromatografía Líquido - Líquido; CFQU: Cromatografía de Fase Químicamente Unida; CII: Cromatografía de Intercambio Iónico; CCF: Cromatografía de Capa Fina; CP: Cromatografía en Papel; CE: Cromatografía de Exclusión; CPG: Cromatografía de Permeación en Gel; CFG: Cromatografía de Filtración en Gel.

### 1.8.2 Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC)

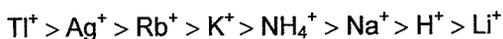
La Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC), utiliza columnas de diámetro muy reducido rellenas de partículas muy pequeñas. Este tipo de columna es muy eficaz, pero ofrece una gran resistencia al flujo de la fase móvil. Por esta razón es necesario emplear sistemas de bombeo de alta presión (hasta 400 atm) que hagan fluir la fase móvil a una velocidad razonable a través de la columna.

Para introducir la muestra se utilizan las válvulas de inyección. Un detector colocado a la salida de la columna, proporciona un registro continuo de la composición del líquido que sale, lo que permite obtener un cromatograma, para identificar y cuantificar los componentes de la muestra.

### 1.8.3 Cromatografía de intercambio iónico

La separación por intercambio iónico se basa en la competencia entre la fase móvil y la muestra iónica por los sitios o grupos activos de una resina intercambiadora de iones (fase estacionaria). Las resinas usadas en intercambiadores iónicos, son polímeros formados de estireno y divinilbenceno, donde los anillos de benceno se pueden modificar produciendo una resina de intercambio catiónico, si contiene grupos sulfonato ( $-\text{SO}_3^-$ ), o una resina de intercambio aniónico, si contiene grupos amonio ( $-\text{NR}_3^+$ ).

En general, los intercambiadores iónicos fijan preferentemente los iones de mayor carga, menor radio hidratado y mayor polarizabilidad. Un orden bastante general de selectividad frente a cationes es el siguiente:



Y frente a aniones es el siguiente:



### 1.8.4 Espectroscopía de Absorción Atómica con atomización en flama

La Espectroscopía de Absorción Atómica (E.A.A.) es una técnica en la cual se utiliza la absorción de luz por átomos, en estado gaseoso, que se encuentran libres, en una flama o en un horno, para determinar concentraciones de átomos.

La absorción y la concentración del analito, están cuantitativamente relacionadas con la Ley de Lambert-Beer, expresada por la siguiente ecuación:

$$A = E L c$$

Donde:

**A** Es la absorbancia y representa al parámetro determinado espectrofotométricamente.

**E** Es la absorptividad, la cual es una constante específica para una longitud de onda de un elemento dado.

**L** Longitud de la trayectoria de la radiación en el medio absorbente.

**c** Es la concentración de la especie absorbente.

La mayoría de los compuestos se descomponen en átomos en fase gaseosa, cuando se calientan a una temperatura suficientemente alta, los espectros de dichos átomos consisten en líneas muy estrechas.

Los espectros de átomos en estado gaseoso, provienen de transiciones entre estados electrónicos.

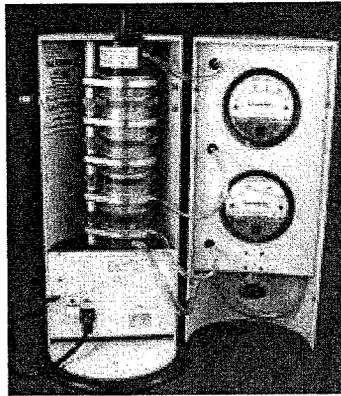
En la espectroscopía atómica de absorción, las muestras se vaporizan a muy altas temperaturas y las concentraciones de átomos seleccionados se determinan midiendo la absorción, en sus longitudes de onda características.

## CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 Equipos

#### 2.1.1 MOUDI (Microorifice Uniform Deposit Impactor)

El MOUDI, es un impactor de partículas de distribución uniforme, que está formado por un gabinete dentro del cual, se colocan cada una de las placas de impactación que corresponden a las ocho etapas de que consta este instrumento (figura 2.1, Marple et al.1991), a cada una de las placas de impactación se le coloca su respectivo filtro, en este caso, los filtros fueron de aluminio de 47 mm de diámetro, en estos se colecta la muestra de aerosol y su distribución es uniforme en todo el filtro, los filtros se sujetan con un anillo y también cada placa se fija mediante imanes que impide su movimiento. El conjunto de las ocho etapas debe quedar completamente sellado para evitar fugas.



**Figura 2.1** MOUDI (Microorifice Uniform Deposit Impactor).

Las partículas de los aerosoles se separan en etapas por tamaños. Los diámetros de las etapas son los siguientes: 10.0, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32 y 0.18  $\mu\text{m}$ .

El principio de funcionamiento en el cual se basa este equipo, es el siguiente: el aire que contiene cierta cantidad de partículas, es succionado con la ayuda de una bomba

de vacío, lo que provoca que el aire penetre al MOUDI a un flujo de 30 L/min, a través de todas las etapas del impactor.

Las partículas más grandes son colectadas en la etapa superior, mientras que las más pequeñas continúan su curso en la corriente de aire.

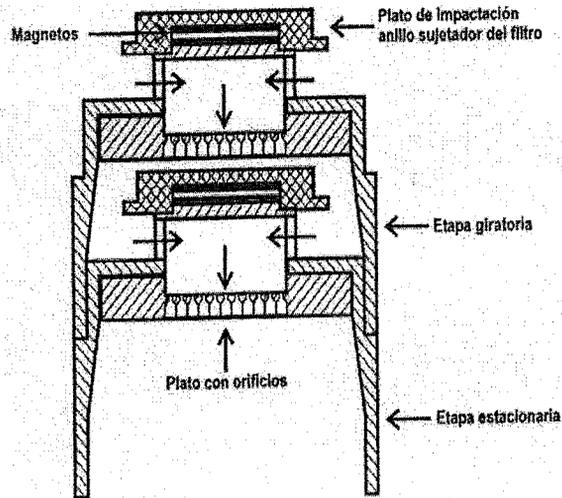


Figura 2.2 Diagrama de una etapa típica del MOUDI.

### 2.1.2 Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución

El sistema cromatográfico utilizado para la determinación de los cationes y los aniones, se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Equipo de HPLC utilizado para la determinación de cationes y aniones. 1.- Sistema de bombeo, 2.- Fase móvil, 3.- Válvula de inyección, 4.- Columna cromatográfica, 5.- Detector de Conductividad, 6.- Módulo supresor de iones, 7.- Sistema de cómputo para el registro de los datos.

Descripción del equipo:

1. - **Sistema de bombeo**, el propósito de una bomba es generar la presión suficiente para transportar la fase móvil a través de todo el sistema cromatográfico. Una bomba debe de cubrir con algunos requerimientos, ser químicamente inerte, permitiendo el uso de una gran variedad de disolventes, generar altas presiones para realizar la mayoría de las separaciones cromatográficas con velocidades de flujo entre 0.5 y 10 ml/min.

2. - **Fase móvil**, es la encargada de transportar la muestra a través de todo el sistema cromatográfico, debe cumplir con los siguientes requisitos: disolver la muestra, no

degradar o disolver la fase estacionaria, tener baja viscosidad y ser compatible con el tipo de detector utilizado.

3.- **Válvula de inyección**, la muestra se introduce en la válvula mediante una jeringa, desplaza el líquido y llena el espacio interno de una pequeña porción del tubo capilar de acero (usualmente el volumen contenido en el tubo es de 10 a 50  $\mu\text{L}$ ). La muestra se inyecta en la columna accionando la válvula de forma tal que la disposición de entrada y salida se invierte. De esta forma se logra inyectar a cualquier presión un intervalo muy amplio de volúmenes de muestra (no es necesario llenar todo el volumen del tubo con la muestra) con un alto grado de reproducibilidad. Las válvulas inyectoras se fabrican solo de materiales inertes, como el teflón y el acero inoxidable, y su diseño es tal que resisten presiones muy elevadas.

4. -**Columna cromatográfica**, en la columna se lleva a cabo la separación de los componentes de la mezcla en estudio. Básicamente la columna consiste en un segmento de tubo de algún material inerte, de diámetro uniforme y capaz de resistir altas presiones, la longitud de la columna es por lo general, entre 10 y 50 cm. El diámetro interno de la columna en la mayoría de los casos es de alrededor de 3 a 4 mm, la fase estacionaria con que está rellena la columna está formada por partículas de tamaño muy pequeño.

5. - **Detector de conductividad**, es un detector específico y sensible a los compuestos iónicos, por lo cual tiene un amplio campo de aplicación en muestras aniónicas, catiónicas, ácidos orgánicos, metales de transición y surfactantes. En el detector se genera una señal en función de la concentración.

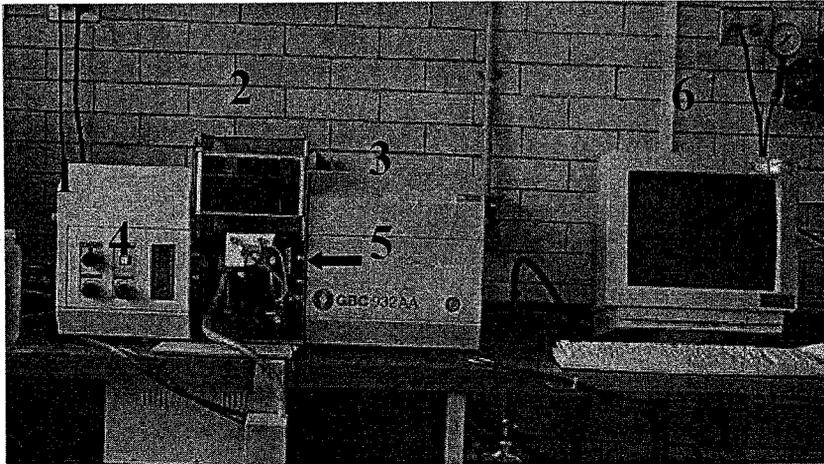
6. - **El módulo supresor** sirve para mejorar la sensibilidad de detección de especies

catiónicas, utilizando cartuchos supresores de fase química sólida (SPCS). El cartucho está envasado con resinas de intercambio aniónico ( $R-NR_3^+ OH^-$ ), la resina está cubierta con una tinta inerte para mantener visibles las indicaciones sobre la condición del cartucho. La resina cambia de color azul a beige cuando el ion  $OH^-$  está siendo reemplazado por los  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$  u otros aniones de los disolventes usados como fase móvil.

7. **-Sistema de cómputo**, es para el registro de los datos, en él se procesan los datos dando como resultado un cromatograma. Una de las técnicas más sencillas para el análisis cuantitativo, es a través del área o altura de los picos. Los avances en software para la cromatografía de líquidos, permiten que las medidas de áreas y alturas se hagan de una manera más exacta y precisa, debido a la automatización por computadora, se pueden monitorear la línea base verificando las posibles señales de fondo, la respuesta del detector haciendo las correcciones necesarias, se puede ajustar la sensibilidad de los picos, se pueden almacenar varios programas; pero se requiere de una persona experta para la interpretación de los datos.

### 2.1.3 Espectrofotómetro de absorción atómica

El equipo de Absorción Atómica utilizado para la determinación de calcio y magnesio se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4** Equipo de Absorción Atómica utilizado para la determinación de calcio y magnesio. 1. – Lámpara de cátodo hueco, 2. - Flama, 3. -Monocromador, 4. – Mezclador de gases (combustible y oxidante), 5.- Nebulizador, 6. -Sistema de cómputo para el registro de los datos.

#### Descripción del equipo:

En el equipo usado para el análisis por espectroscopía atómica de absorción, la muestra líquida se aspira hacia una **flama** con temperaturas entre 2000 a 3000° K. El líquido se evapora y las partículas sólidas restantes se atomizan (se descomponen en átomos) en la flama, que viene a sustituir a la celda en la espectroscopía ordinaria o convencional. El camino óptico de la flama suele ser de 10 cm. La radiación de frecuencias específicas, que son absorbidas por los átomos en estado gaseoso, procede de una **lámpara de cátodo hueco** (fuente de luz); el cátodo de esta lámpara está hecho del mismo elemento que se va a determinar.

La lámpara de cátodo hueco, está llena con gas Ne o Ar, a una presión de aproximadamente 130 a 700 Pa (1 a 5 torr). Cuando entre el ánodo y el cátodo se aplica una diferencia de potencial suficientemente grande, el gas que se encuentra dentro, se ioniza y los iones positivos se aceleran hacia el cátodo. Estos inciden en el cátodo con energía suficiente para "arrancar" átomos metálicos del cátodo, los cuales pasan a la fase gaseosa. Muchos de los átomos desalojados están en estado excitado; emiten fotones y regresan al estado basal o fundamental. Esta radiación atómica es exactamente de la misma frecuencia que los átomos del analito en la flama.

Para la atomización de la muestra, el equipo cuenta con un **mechero de premezcla** (también llamado quemador de premezclado) en el cual la muestra, el oxidante y el combustible, se reúnen antes de su introducción en la flama. La muestra en solución se aspira hacia el **nebulizador** por el flujo rápido del oxidante, que pasa sobre la punta del capilar por donde circula la muestra. El líquido se divide en un fino aerosol al salir de la punta del nebulizador. El aerosol se dirige a gran velocidad contra una esfera de vidrio, sobre la cual, las gotas se dividen en partículas más pequeñas. La formación de partículas obtenidas de esta manera, se denomina nebulización. El aerosol, el oxidante y el combustible, deben atravesar luego una serie de obstáculos que favorecen el mezclado y evitan que pasen gotas grandes de líquido.

El líquido que se colecta en la parte inferior de la cámara de aerosol, se elimina por drenado. Sólo una neblina muy fina que contiene aproximadamente el 5% de la muestra inicial, alcanza la flama.

La combinación más común de combustible y oxidante, es la de acetileno y aire, la cual produce una flama con temperaturas de aproximadamente 2400 a 2700° K.

Las gotas que penetran en la flama, pierden primero el agua por evaporación; después, lo que queda de la muestra debe vaporizarse y descomponerse en átomos.

La función del **monocromador**, es la de proveer una línea espectral aislada de cualquier otra radiación, que venga de la fuente o de la flama. La función del detector es la de convertir la radiación en una señal eléctrica cuantificable. Después de la ampliación, la señal podrá ser interpretada en una gran variedad de dispositivos. Esto incluye desde simples medidores analógicos, digitales, impresoras, teletipos y registradores. Cada tipo puede ser diseñado para leer directamente en absorbancia o en concentración. Los instrumentos modernos proveen una salida adicional para computadoras.

## **2.2 Sitio de muestreo**

Para la obtención de las muestras se utilizó un impactor de cascada de ocho etapas (MOUDI, por sus siglas en inglés Micro Orifice Uniform Deposit Impactor. Marca MSP, modelo 100), fueron tomadas en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de Ciudad Universitaria, ubicado en el sur-oeste de la ciudad de México. Se considera importante este sitio de muestreo por tener datos históricos de diferentes campañas de mediciones de parámetros meteorológicos, contaminantes atmosféricos, radiación solar, propiedades ópticas como coeficientes de extinción, espesor óptico y además de contar con una instalación adecuada que permite obtener las muestras de las partículas presentes en la atmósfera, evitando la influencia del suelo.

Este sistema de muestreo se instaló en el techo del Centro de Ciencias de la Atmósfera, consta de una chimenea y un extractor de aire, colocado en el extremo inferior.

El impactor de partículas de distribución uniforme MOUDI se conecta a la chimenea a través de una manguera de silicón conductivo (Conductive Silicone Tubing, 0.44" de diámetro interno, TSI), lo que evita la acumulación de estática y minimiza la pérdida de partículas por efectos de pared. En cada una de las etapas del MOUDI, se colocan filtros de aluminio de 47 mm de diámetro, en estos se depositarán las partículas de aerosol de acuerdo al tamaño de cada una de las etapas del MOUDI, cada muestreo se llevó a cabo por un periodo de 24 horas, empleando un flujo de 30 L min<sup>-1</sup>. El muestreo se hizo por 40 días durante los meses de febrero y marzo del 2003 y se colectaron 320 filtros.

### **2.3 Limpieza de material**

La limpieza del material que se utiliza para el análisis de cromatografía líquida, se realiza de la siguiente manera: se lava con agua de la llave, después con agua destilada y por último se lava meticulosamente con agua desionizada.

El procedimiento de limpieza del material de vidrio pyrex que se emplea para el análisis en absorción atómica, es el siguiente:

1. Enjuagar con agua desionizada.
2. Llenar los recipientes con HCl 6 N al 20%, por 48 horas.
3. Descartar el HCl y enjuagar con agua destilada.
4. Llenar con agua desionizada por 24 horas.
5. Descartar el agua y enjuagar meticulosamente con agua desionizada.

El agua que se utiliza es agua grado tipo I (agua desionizada con una conductividad eléctrica < 18.2  $\mu$  mho/cm a 25<sup>o</sup>C).

## 2.4 Reactivos

HNO<sub>3</sub> (Mallinckrodt, 69-70%)

Metanol (JT Baker, grado HPLC)

Acetona (JT Baker, grado HPLC)

NaOH (Merck, lentejas)

Ácido ftálico (Merck)

Óxido de lantano (Merck)

HCl (JT Baker, 36-38%)

Cu (alambre)

## 2.5 Tratamiento de las muestras

El siguiente procedimiento se le realizó a cada uno de los 320 filtros colectados durante el muestreo.

- Cada filtro fué cortado en partes pequeñas, estas fueron colocadas en vasos de precipitado de 10 mL, se les agregaron 3 mL de agua desionizada y fueron colocadas en un baño de ultrasonido, por un tiempo de una hora, para la extracción de partículas.
- Cuando las soluciones estuvieron a temperatura ambiente, el líquido se filtró sobre matraces aforados de 5 mL, a través de un filtro de membrana de nylon con poro de 0.45 µm y 25 mm de diámetro. Los matraces se llevaron hasta la marca de aforo con agua desionizada.
- Las soluciones se guardan en refrigeración hasta el momento de ser analizadas.

## 2.6 Análisis de las muestras

A cada una de las muestras se le determinaron los siguientes iones: cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), los cuales fueron cuantificados, por medio de la técnica de Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC); el equipo que se utilizó fue un Perkin Elmer, modelo isocratic LC Pump 250, (figura 2.3).

Para la determinación de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) se usó la técnica de absorción atómica por medio de flama, empleando un espectrofotómetro de absorción atómica GBC 932 AA, (figura 2.4).

### 2.6.1 Determinación de cationes por HPLC

Los cationes que se determinaron usando la técnica de HPLC fueron: sodio ( $\text{Na}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ); se empleó una columna Hamilton PRP-X-200 de intercambio catiónico, la fase móvil usada fué una disolución de  $\text{HNO}_3$  4 mM y metanol en una composición de 7:3 (agua/metanol). Método Hamilton.

Las inyecciones realizadas tanto para curvas de calibración como para muestras fueron de 50  $\mu\text{L}$ .

Los límites de detección para estos iones son:  $\text{Na}^+ = 0.04 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ = 0.05 \text{ mg/L}$  y  $\text{K}^+ = 0.05 \text{ mg/L}$ . Los límites de detección para todos los iones cuantificados, fueron determinados por los técnicos del laboratorio de Química Atmosférica

### 2.6.2 Determinación de aniones por HPLC

Los aniones determinados por HPLC fueron: cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); se utilizó una columna Hamilton PRP-X100 de intercambio aniónico. La fase móvil empleada fué una disolución de ácido ftálico 2 mM en acetona en una relación

1:10, (acetona/agua); una vez hecha la mezcla se le ajusta el pH = 5 con NaOH.

Método Metrohm.

Las inyecciones realizadas tanto para curvas de calibración como para muestras fueron de 100  $\mu$ L. Los límites de detección correspondientes a los aniones son: Cl<sup>-</sup> = 0.04 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 0.07 mg/L y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = 0.2 mg/L.

Para el análisis de cationes y aniones se usó un flujo de 2 mL por minuto.

La técnica de elución usada para todos los iones fue isocrática, ya que durante toda la corrida cromatográfica, la presión es constante y la fase móvil se mantiene con una composición constante.

### **2.6.3 Determinación de calcio y magnesio por Espectroscopia de Absorción Atómica (E.A.A.)**

Para la determinación de calcio y magnesio, se usó aire como gas oxidante y acetileno como combustible, ambos gases de alta pureza, la flama usada fue reductora.

Las longitudes de ondas usadas son las siguientes:  $\lambda$  Ca<sup>2+</sup> = 422.7 nm,  $\lambda$  Mg<sup>2+</sup> = 285.2 nm. Los límites de detección son: 0.01 mg/L para calcio y 0.0032 mg/L para magnesio.

A las muestras se les agregó 30  $\mu$ L de disolución de óxido de lantano, que sirve como agente liberador, que evita interferencias de fosfato en la determinación de calcio.

### **2.7 Disoluciones estándar**

Las disoluciones estándar utilizadas para elaborar las gráficas de calibración para iones, son de marca High-Purity Standars. Las concentraciones y el número de lote se muestran a continuación:

Cl<sup>-</sup>: 1000 ± 0.5 µg/mL en H<sub>2</sub>O (lote 525713)  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 1000 ± 0.5 µg/mL en H<sub>2</sub>O (lote 600918)  
SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: 1000 ± 0.5 µg/mL en H<sub>2</sub>O (lote 526606)  
Na<sup>+</sup>: 1000 ± 3 µg/mL en HNO<sub>3</sub> al 1% (lote 423227)  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: 1000 ± 0.5 µg/mL en H<sub>2</sub>O (lote 517331)  
K<sup>+</sup>: 1000 ± 3 µg/mL en HNO<sub>3</sub> al 1% (lote 427507)  
Ca<sup>2+</sup>: 1000 ± 3 µg/mL en HNO<sub>3</sub> al 2% (lote 505216)  
Mg<sup>2+</sup>: 1000 ± 3 µg/mL en HNO<sub>3</sub> al 2% (lote 502515)

## 2.8 Disoluciones

Soluciones stock de Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y K<sup>+</sup>, <sup>-</sup> de 10 ppm

Soluciones stock de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> de 100 ppm

Disolución de óxido de lantano, el óxido de lantano se seca a 105 °C por una hora, se pesan 11.7 g de éste y se colocan en un matraz volumétrico de 100 mL, se le adicionan cuidadosamente 50 mL de HCl 6 N y se afora.

## 2.9 Preparación de gráficas de calibración

El método de calibración que se usó para la determinación y cuantificación de cloruros, nitratos, sulfatos, sodio, amonio, potasio, calcio y magnesio, es el método de calibración de estándar externo. Con esta técnica se preparan soluciones estándar alrededor de la concentración de las muestras. Después se corren bajo las mismas condiciones analíticas, obteniéndose las alturas de los picos y/o las absorbancias, según sea el caso y se construye una gráfica de altura contra concentración (cromatografía) y las gráficas correspondientes de absorbancia contra concentración (espectroscopía).

Analizando las muestras en iguales condiciones, con las alturas o absorbancias, extrapolando en la gráfica de calibración, se encuentran las concentraciones de las muestras.

Se utilizaron estándares certificados de 1000 ppm para cada ion. A partir de estos estándares se preparan las soluciones stock de concentración de 10 ppm para los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , y de 100 ppm para los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

Los intervalos de concentración usados para cada gráfica de calibración son las siguientes:

$\text{Cl}^-$ : 0.5 a 3.0 ppm.

$\text{NO}_3^-$ : 0.1 a 1.5 ppm.

$\text{SO}_4^{2-}$ : 1.0 a 15.0 ppm.

$\text{Na}^+$ : 0.5 a 2.0 ppm.

$\text{NH}_4^+$ : 0.1 a 0.5 ppm.

$\text{K}^+$ : 0.5 a 2.0 ppm.

$\text{Ca}^{2+}$ : 0.1 a 0.4 ppm.

$\text{Mg}^{2+}$ : 0.25 a 2.0 ppm.

Cada día que se realizaba el análisis de las muestras, se preparaba una gráfica de calibración, para cada ion.

Las figuras 2.5 a, b, c, nos muestran los ejemplos de cromatogramas que se obtienen de inyectar la mezcla de los estándares 1, 2 y 3 de los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), así tenemos que los tiempos promedio de retención para  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , son: 1.43, 2.42 y 6.55 respectivamente.

Las concentraciones del estándar 1 para Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> son: 0.5, 0.1 y 1.0, para el estándar 2 son: 1.0, 0.5 y 5.0 y para el estándar 3 son: 3.0, 1.5 y 15.0 mg/L, respectivamente.

Figuras 2.5: Ejemplos de cromatogramas para estándares de aniones.

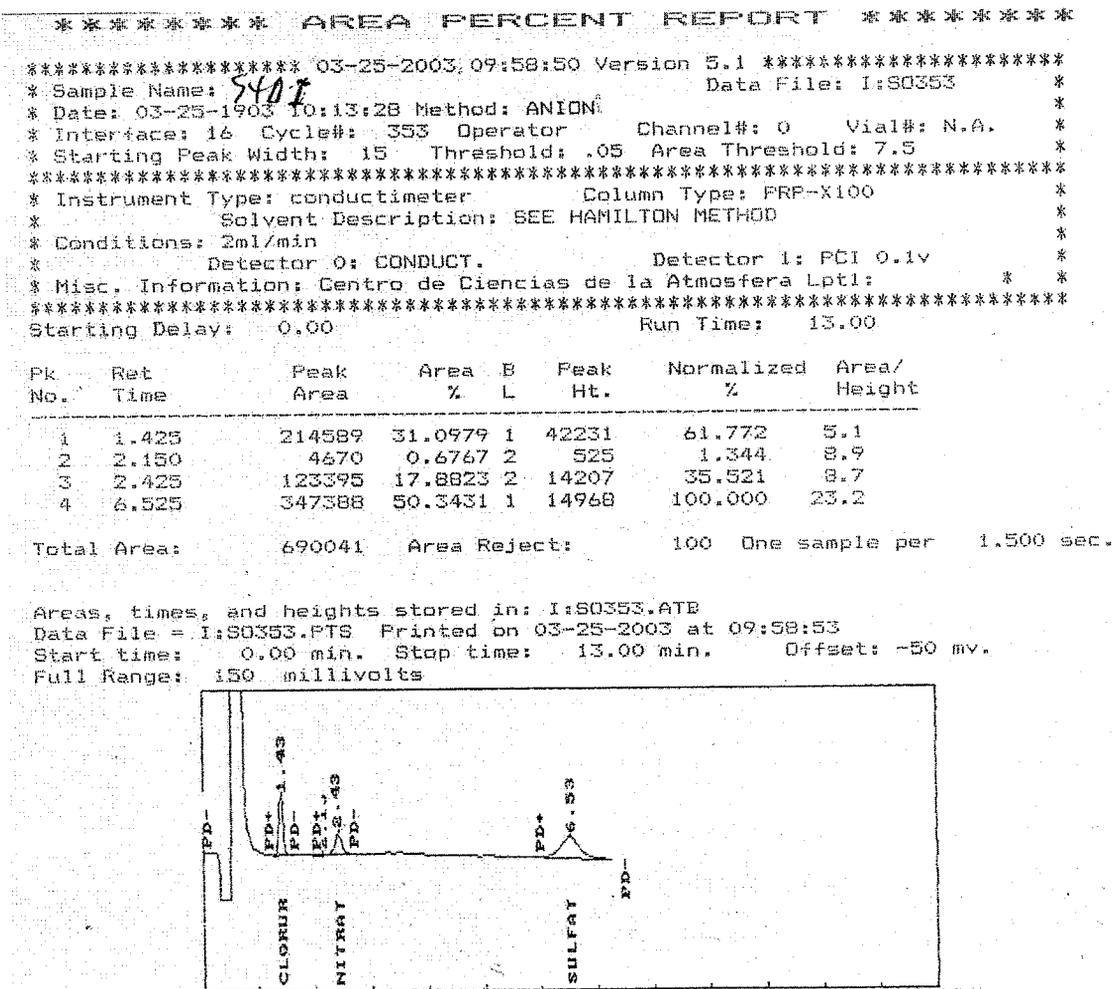


Figura 2.5 a Estándar 1 para aniones.

\*\*\*\*\* AREA PERCENT REPORT \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* 03-25-2003 10:27:07 Version 5.1 \*\*\*\*\*  
 \* Sample Name: **SFOIT** Data File: I:80356 \*  
 \* Date: 03-25-2003 10:45:23 Method: ANION \*  
 \* Interface: 16 Cycle#: 356 Operator: Channel#: 0 Vial#: N.A. \*  
 \* Starting Peak Width: 15 Threshold: .05 Area Threshold: 7.5 \*  
 \*\*\*\*\*  
 \* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 \*  
 \* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD \*  
 \* Conditions: 2ml/min \*  
 \* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v \*  
 \* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: \*  
 \*\*\*\*\*  
 Starting Delay: 0.00 Ending retention time: 13.00

PK No.	Ret Time	Peak Area	Area %	B L	Peak Ht.	Normalized %	Area/Height
1	1.425	394130	16.2509	1	75791	25.159	5.2
2	2.400	464597	19.1564	1	54581	29.657	8.5
3	6.550	1566555	64.5927	1	71504	100.000	21.9

Total Area: 2425282 Area Reject: 100 One sample per 1.500 sec.

Areas, times, and heights stored in: I:80356.ATB  
 Data File = I:80356.PTS Printed on 03-25-2003 at 10:27:11  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 13.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 150 millivolts

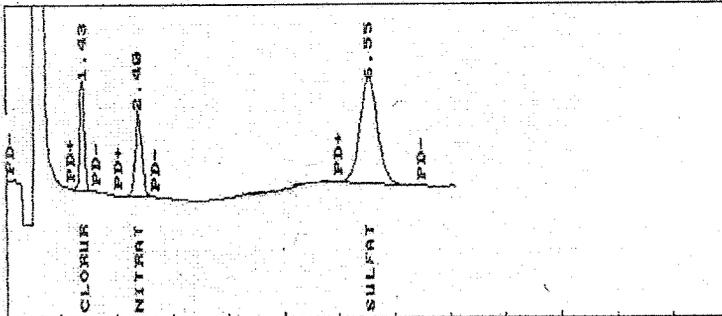


Figura 2.5 b Estándar 2 para aniones.

\*\*\*\*\* AREA PERCENT REPORT \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* 03-25-2003 10:35:30 Version 5.1 \*\*\*\*\*  
 \* Sample Name: **STD III** Data File: I:90357 \*  
 \* Date: 03-25-1903 11:02:08 Method: ANION \*  
 \* Interface: 16 Cycle#: 357 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. \*  
 \* Starting Peak Width: 15 Threshold: .05 Area Threshold: 7.5 \*  
 \*\*\*\*\*  
 \* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 \*  
 \* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD \*  
 \* Conditions: 2ml/min \*  
 \* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v \*  
 \* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: \* \*  
 \*\*\*\*\*  
 Starting Delay: 0.00 Run Time: 13.00

PK No.	Ret Time	Peak Area	Area %	B L	Peak Ht.	Normalized %	Area/Height
1	1.425	1159757	16.3379	1	208613	24.754	5.6
2	2.425	1253690	17.6612	1	147293	26.759	8.5
3	6.600	4685112	66.0009	1	210225	100.000	22.3

Total Area: 7098557 Area Reject: 100 One sample per 1.500 sec.

Areas, times, and heights stored in: I:90357.ATB  
 Data File = I:90357.PTS Printed on 03-25-2003 at 10:35:34  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 13.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 150 millivolts

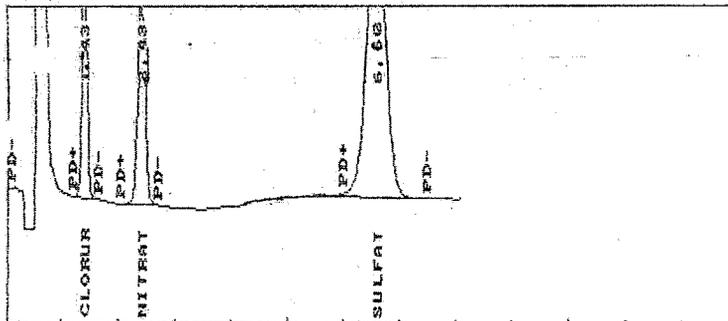
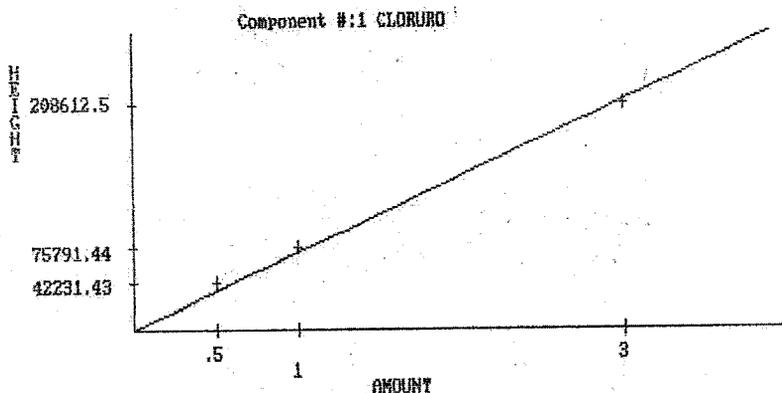


Figura 2.5 c Estándar 3 para aniones.

Las figuras 2.5 d, e, f, nos muestran las gráficas de calibración para Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, que se obtienen de los cromatogramas 2.5 a, b, c.

Method ANION  
 Sample  
 Operator  
 Run date 03-25-2003 10:39:23 version: 180  
 Printed on 03-25-2003 AT 10:39:41  
 Straight Line Fit forced through Origin.



LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	0.5000	42231
2	1.0000	75791
3	3.0000	208613

Y = SLOPE \* X + INTERCEPT

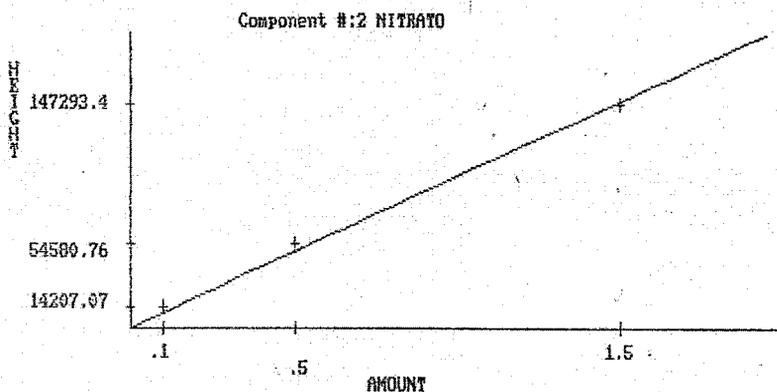
Height = 7.0512E+04 \* Amount + 0.0000E+00

Amount = 1.4182E-05 \* Height + 0.0000E+00

R squared = 0.9983

Figura 2.5 d Gráfica de calibración para Cloruros.

Method ANION  
 Sample  
 Operator  
 Run date 03-25-2003 10:39:23 version: 180  
 Printed on 03-25-2003 AT 10:40:02  
 Straight Line Fit forced through Origin.



Component 2 = NITRATO  
 EXTERNAL STANDARD CALIBRATION

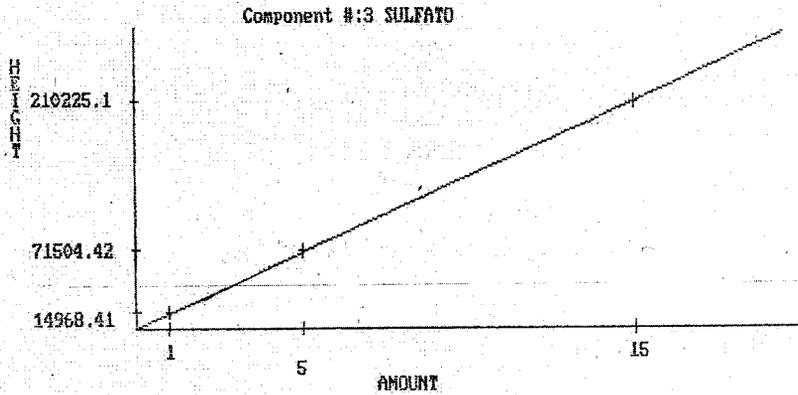
LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	0.1000	14207
2	0.5000	54581
3	1.5000	147293

$$Y = \text{SLOPE} * X + \text{INTERCEPT}$$

Height = 9.9463E+04 \* Amount + 0.0000E+00  
 Amount = 1.0054E-05 \* Height + 0.0000E+00  
 R squared = 0.9982

Figura 2.5 e Gráfica de calibración para Nitratos.

Method ANION  
 Sample  
 Operator  
 Run date 03-25-2003 10:39:23 version: 180  
 Printed on 03-25-2003 AT 10:40:22  
 Straight Line Fit forced through Origin.



Component 3 = SULFATO  
 EXTERNAL STANDARD CALIBRATION  
 HEIGHT

LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	1.0000	14968
2	5.0000	71504
3	15.0000	210225

Y = SLOPE \* X + INTERCEPT

Height = 1.4047E+04 \* Amount + 0.0000E+00  
 Amount = 7.1188E-05 \* Height + 0.0000E+00  
 R squared = 0.9999

Figura 2.5 f Gráfica de calibración para Sulfatos.

La figura 2.5 g, es un ejemplo de un cromatograma de una muestra inyectada y leída de las gráficas de calibración.

```

***** EXTERNAL STANDARD TABLE *****
***** 03-25-2003 13:29:07 Version 5.1 *****
* Sample Name: 299 Data File: I:SD377 *
* Date: 03-25-1903 16:01:49 Method: ANION 03-25-2003 10:39:23 # 180 *
* Interface: 16 Cycle#: 377 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. *
* Starting Peak Width: 15 Threshold: .05 Area Threshold: 7.5 *
*****
* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 *
* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD *
* Conditions: 2ml/min *
* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v *
* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: *
*****
Starting Delay: 0.00 Ending retention time: 13.00
Area reject: 100 One sample per 1.500 sec.
Amount injected: 1.00 Dilution factor: 1.00
Sample Weight: 1.00000

```

PEAK NUM	RET TIME	PEAK NAME	CONCENTRATION in ppm	NORMALIZED CONC	AREA	HEIGHT	AREA/ HEIGHT	REF PEAK	% DELTA RET TIME	CONC/AREA
1	1.425	CLORURO	0.2913	21.3107%	98990	20540	4.8	1	0	1.4182E-05
2	2.400	NITRATO	0.1151	8.4226%	76630	11451	8.4	2	0	1.0054E-05
4	6.600	SULFATO	0.9605	79.2666%	306084	13492	22.7	2	0	7.1188E-05
TOTAL AMOUNT =			1.3669							

Areas, times, and heights stored in: I:SD377.ATB  
 Data File = I:SD377.PTS Printed on 03-25-2003 at 13:29:11  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 13.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 150 millivolts

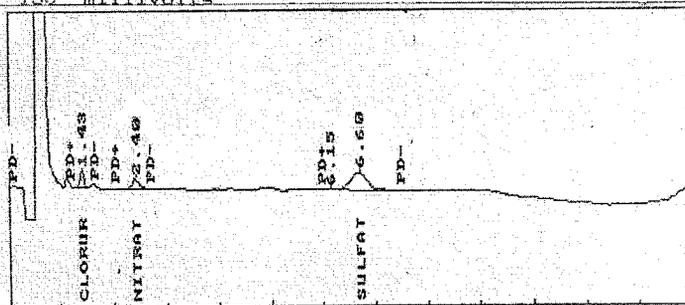


Figura 2.5 g Ejemplo de una muestra para la determinación de aniones.

Las figuras 2.6 a, b, c, d, nos muestran los cromatogramas que se obtienen de inyectar la mezcla de los estándares 1, 2, 3 y 4 de los cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$ ), así tenemos que los tiempos promedio de retención para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$ , son: 4.20, 5.10 y 5.90 respectivamente.

Las concentraciones del estándar 1 para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$  son: 0.5, 0.1 y 0.5, para el estándar 2 son: 1.0, 0.15 y 1.0, para el estándar 3 son: 1.5, 0.35 y 1.5 y para el estándar 4 son: 2.0, 0.5 y 2.0 mg/L, respectivamente.

```

***** AREA PERCENT REPORT *****
***** 02-27-2003 11:57:20 Version 5.1 *****
* Sample Name: AD Data File: I:NH215
* Date: 02-27-2003 12:24:17 Method: CATION
* Interface: 16 Cycle#: 215 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A.
* Starting Peak Width: 50 Threshold: .01 Area Threshold: 5
*****
* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100
* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD
* Conditions: 2ml/min Detector 1: PCI 0.1v
* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1:
*****
Starting Delay: 0.00 Run Time: 8.00
  
```

PK No.	Ret Time	Peak Area	Area %	B L	Peak Ht.	Normalized %	Area/Height
1	4.200	715421	53.8513	3	51778	100.000	13.8
2	4.800	1061	0.0799	4	177	0.148	6.0
3	5.100	168111	12.6541	2	11169	23.498	15.1
4	5.900	443920	33.4148	2	26042	62.050	17.0

Total Area: 1328513 Area Reject: 100 One sample per 6.000 sec.

Areas, times, and heights stored in: I:NH215.ATB  
 Data File = I:NH215.PTS Printed on 02-27-2003 at 11:57:24  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 8.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 100 millivolts

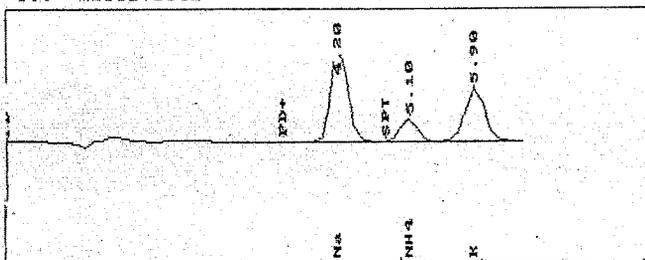


Figura 2.6 a Estándar 1 para cationes.

\*\*\*\*\* AREA PERCENT REPORT \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* 02-27-2003 11:32:25 Version 5.1 \*\*\*\*\*  
 \* Sample Name: **STD 2** Data File: I:NH212 \*  
 \* Date: 02-27-1903 11:33:08 Method: CATION \*  
 \* Interface: 16 Cycle#: 212 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. \*  
 \* Starting Peak Width: 50 Threshold: .01 Area Threshold: 5 \*  
 \*\*\*\*\*  
 \* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 \*  
 \* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD \*  
 \* Conditions: 2ml/min \*  
 \* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v \*  
 \* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: \* \*  
 \*\*\*\*\*  
 Starting Delay: 0.00 Run Time: 8.00

PK No.	Ret Time	Peak Area	Area %	L	Peak Ht.	Normalized Area %	Height
1	4.200	1350410	54.3854	3	88760	100.000	15.2
2	4.800	2273	0.0915	4	379	0.168	6.0
3	5.100	260675	10.4982	2	15849	19.303	16.4
4	6.000	869678	35.0248	2	46643	64.401	18.6

Total Area: 2483036 Area Reject: 100 One sample per 6.000 sec

Areas, times, and heights stored in: I:NH212.ATB  
 Data File = I:NH212.PTS Printed on 02-27-2003 at 11:32:28  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 8.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 100 millivolts

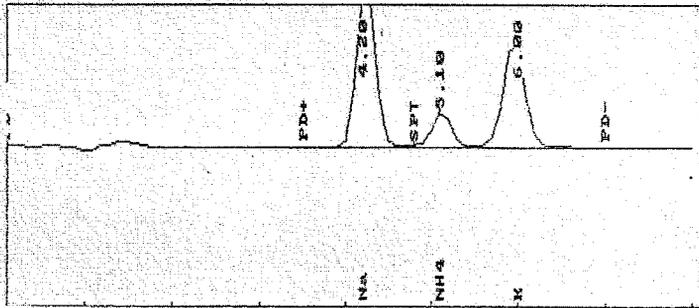


Figura 2.6 b Estándar 2 para cationes.

\*\*\*\*\* AREA PERCENT REPORT \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* 02-27-2003 11:43:20 Version 5.1 \*\*\*\*\*  
 \* Sample Name: STD 3 Data File: I:NH213 \*  
 \* Date: 02-27-1903 11:56:05 Method: CATION \*  
 \* Interface: 16 Cycle#: 213 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. \*  
 \* Starting Peak Width: 50 Threshold: .01 Area Threshold: 5 \*  
 \* Instrument type: conductimeter Column Type: PRP-X100 \*  
 \* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD \*  
 \* Conditions: 2ml/min \*  
 \* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v \*  
 \* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: \*  
 \*\*\*\*\*  
 Starting Delay: 0.00 Run Time: 8.00

Pk No.	Ret Time	Peak Area	Area %	B L	Peak Ht.	Normalized %	Area/Height
1	4.200	2055588	52.9684	2	143503	100.000	14.3
2	5.100	505603	13.0284	2	31009	24.597	16.3
3	5.900	1319588	34.0032	2	72446	64.195	18.2

Total Area: 3880779 Area Reject: 100 One sample per 6.000 sec.

Areas, times, and heights stored in: I:NH213.ATB  
 Data File = I:NH213.PTS Printed on 02-27-2003 at 11:43:24  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 8.00 min. Offset: -50 mV.  
 Full Range: 100 millivolts

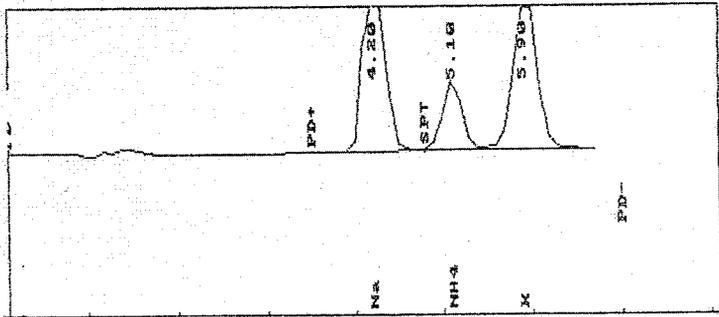


Figura 2.6 c Estándar 3 para cationes.

\*\*\*\*\* AREA PERCENT REPORT \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* 02-27-2003 11:50:29 Version 5.1 \*\*\*\*\*  
 \* Sample Name: STD 4 Data File: I:NH214 \*  
 \* Date: 02-27-1903 12:10:17 Method: CATION \*  
 \* Interface: 16 Cycle#: 214 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. \*  
 \* Starting Peak Width: 50 Threshold: .01 Area Threshold: 5 \*  
 \*\*\*\*\*  
 \* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 \*  
 \* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD \*  
 \* Conditions: 2ml/min \*  
 \* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.1v \*  
 \* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: \* \*  
 \*\*\*\*\*  
 Starting Delay: 0.00 Run Time: 8.00

Pk No.	Ret Time	Peak Area	Area %	B L	Peak Ht.	Normalized %	Area/Height
1	4.200	2737968	51.6076	2	197347	100.000	13.9
2	5.100	809164	15.2518	2	49028	29.553	16.5
3	5.900	1758222	33.1405	2	100505	64.216	17.5

Total Area: 5305353 Area Reject: 100 One sample per 6.000 sec

Areas, times, and heights stored in: I:NH214.ATB  
 Data File = I:NH214.PTS Printed on 02-27-2003 at 11:50:33  
 Start time: 0.00 min. Stop time: 8.00 min. Offset: -50 mv.  
 Full Range: 100 millivolts

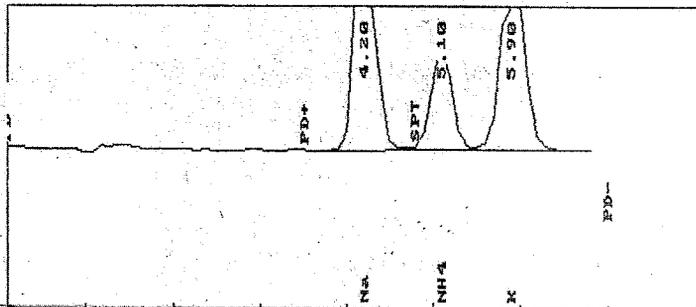
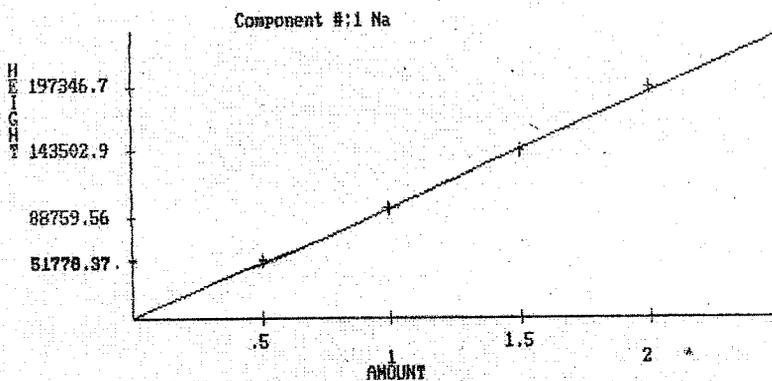


Figura 2.6 d Estándar 4 para cationes.

Las figuras 2.6 e, f, g, nos muestran las gráficas de calibración para Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y K<sup>+</sup> que se obtienen de los cromatogramas 2.6 a, b, c, d.

Method CATION  
 Sample CATIONES  
 Operator  
 Run date 02-27-2003 11:59:01 version: 1237  
 Printed on 02-27-2003 AT 11:59:34  
 Straight Line Fit forced through Origin.



Component 1 = Na

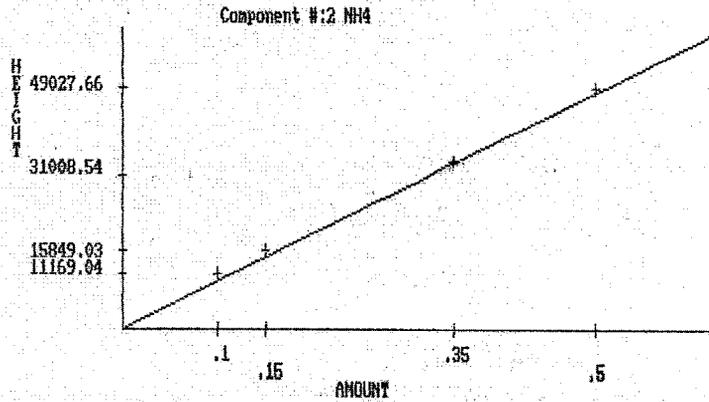
LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	0.5000	51778
2	1.0000	88760
3	1.5000	143503
4	2.0000	197347

Y = SLOPE \* X + INTERCEPT

Height = 9.6613E+04 \* Amount + 0.0000E+00  
 Amount = 1.0351E-05 \* Height + 0.0000E+00  
 R squared = 0.9987

Figura 2.6 e Gráfica de calibración para Sodio.

Method CATION  
 Sample CATIONES  
 Operator  
 Run date 02-27-2003 11:59:01 version: 1237  
 Printed on 02-27-2003 AT 12:00:15  
 Straight Line Fit forced through Origin.



Component 2 = NH4  
 EXTERNAL STANDARD CALIBRATION

LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	0.1000	11169
2	0.1500	15849
3	0.3500	31009
4	0.5000	49028

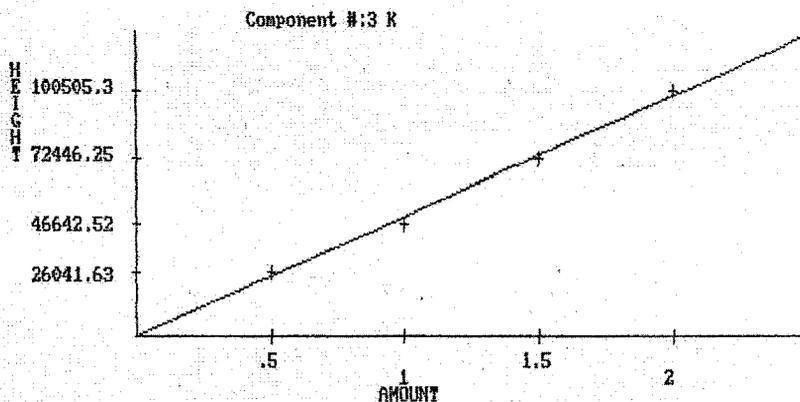
Y = SLOPE \* X + INTERCEPT

---

Height = 9.5953E+04 \* Amount + 0.0000E+00  
 Amount = 1.0422E-05 \* Height + 0.0000E+00  
 R squared = 0.9967

Figura 2.6 f Gráfica de calibración para Amonio.

Method CATION  
 Sample CATIONES  
 Operator  
 Run date 02-27-2003 11:59:01 version: 1237  
 Printed on 02-27-2003 AT 12:00:45  
 Straight Line Fit forced through Origin.



Component 3 = K  
 EXTERNAL STANDARD CALIBRATION

LEVEL	AMOUNT	HEIGHT
1	0.5000	26042
2	1.0000	46643
3	1.5000	72446
4	2.0000	100505

Y = SLOPE \* X + INTERCEPT

Height = 4.9246E+04 \* Amount + 0.0000E+00  
 Amount = 2.0306E-05 \* Height + 0.0000E+00  
 R squared = 0.9992

Figura 2.6 g Gráfica de calibración para Potasio.

La figura 2.6 h, es el ejemplo de un cromatograma de una muestra inyectada y leída de las gráficas de calibración.

```

***** EXTERNAL STANDARD TABLE *****
***** 02-27-2003 12:38:52 Version 5.1 *****
* Sample Name: 211 Data File: I:nh216 *
* Date: 02-27-1903 12:10:27 Method: CATION 02-27-2003 13:12:53 # 1239 *
* Interface: 16 Cycle#: 216 Operator Channel#: 0 Vial#: N.A. *
* Starting Peak Width: 60 Threshold: .01 Area Threshold: 5 *
*****
* Instrument Type: conductimeter Column Type: PRP-X100 *
* Solvent Description: SEE HAMILTON METHOD *
* Conditions: 2ml/min *
* Detector 0: CONDUCT. Detector 1: PCI 0.iv *
* Misc. Information: Centro de Ciencias de la Atmosfera Lpt1: *
*****
Starting Delay: 0.00 Ending retention time: 8.00
Area reject: 100 One sample per 6.000 sec.
Amount injected: 1.00 Dilution factor: 1.00
Sample Weight: 1.00000
    
```

PEAK NUM	RET TIME	PEAK NAME	CONCENTRATION in ppm	NORMALIZED CONC	AREA	HEIGHT	AREA/ HEIGHT	REF PEAK	% DELTA RET TIME	CONC/AREA
2	4.200	Na	0.5606	75.2951%	732593	54161	13.5 3	2	0	1.0351E-05
4	5.100	NH4	0.0505	6.7778%	73709	4842	15.2 2	4	0	1.0422E-05
5	5.900	K	0.1335	17.9271%	108210	6573	16.5 1	5	0	2.0306E-05

TOTAL AMOUNT = 0.7445

```

Plot of data file: I:nh216.PTS
Date: 02-27-2003 Time: 12:40:39
Sample Name:
Start Time= 0.10 Stop Time = 8.10 Min. Scale= 50000 Max. Scale= 150000
    
```

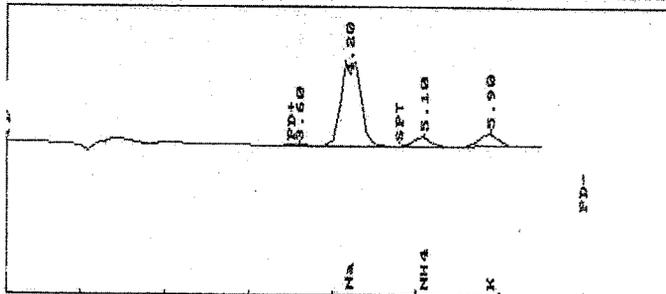


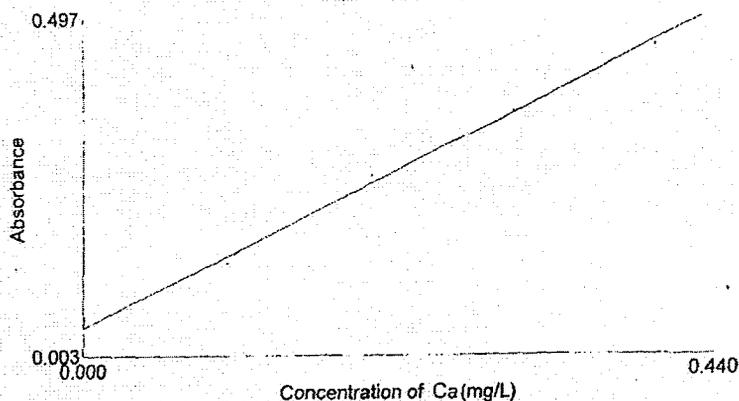
Figura 2.6 h Ejemplo de una muestra para la determinación de cationes.

Las figuras 2.7 a, b son un ejemplo de una gráfica de calibración y algunas lecturas de muestras para  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , medidas con espectroscopía de absorción atómica.

Analysis  
 Filename C:\Archivos de programa\GBC Avanta Ver 1.32\1SALBAEZ.anl  
 Element Ca  
 Date Tue Feb 18 11:55:45 2003

Full Calibration  
 Calibration Mode Linear Least Squares Max Error: 0.011 R<sup>2</sup>: 0.997

Sample Label	Conc. (mg/L)	%RSD	Mean Abs.	Replicates	
Cal Blank	---	HIGH	0.0009	0.0007	0.0012
Standard 1	0.100	0.26	0.1397	0.1400	0.1395
Standard 2	0.200	0.09	0.2652	0.2650	0.2654
Standard 3	0.300	0.46	0.3613	0.3601	0.3625
Standard 4	0.400	0.05	0.4556	0.4554	0.4557



Sample Label	Conc. (mg/L)	%RSD	Mean Abs.	Replicates	
11	0.404	0.49	0.4665	0.4649	0.4681
12	High	0.07	0.5035	0.5033	0.5038
13	ND	HIGH	-0.0003	0.0000	-0.0006
14	0.112	0.04	0.1618	0.1618	0.1619
15	0.304	0.29	0.3614	0.3606	0.3621
16	0.047	0.05	0.0938	0.0939	0.0938
17	0.366	0.53	0.4264	0.4280	0.4248
18	0.378	0.40	0.4388	0.4376	0.4400
19	0.400	0.05	0.4624	0.4626	0.4623
21	ND	HIGH	-0.0001	-0.0001	-0.0000

Figura 2.7 a Gráfica de calibración para Calcio y ejemplos de lecturas de algunas muestras.

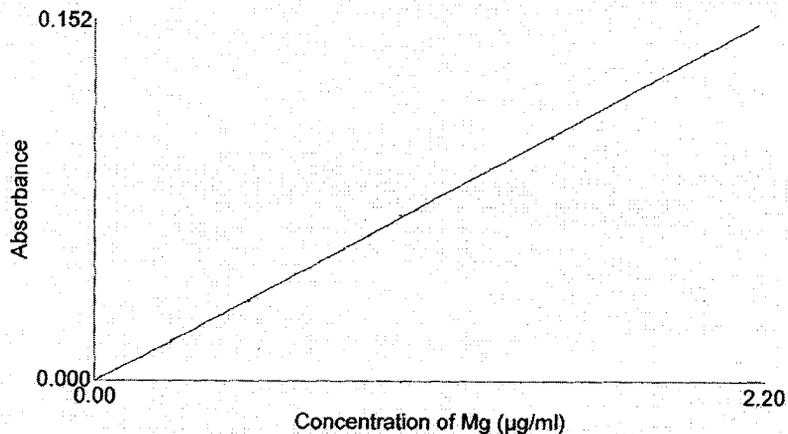
Analysis  
 Filename  
 Date

C:\Archivos de programa\GBC Avanta Ver 1.32\ALBAEZ.anl  
 Wed Feb 26 11:57:53 2003

Full Calibration  
 Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error : 0.014 R<sup>2</sup> : 1.000

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates	
Cal Blank	---	HIGH	0.0006	0.0010	0.0002
Standard 1	0.250	2.33	0.0168	0.0170	0.0165
Standard 2	0.500	1.37	0.0337	0.0334	0.0340
Standard 3	1.000	0.05	0.0698	0.0698	0.0697
Standard 4	1.500	0.56	0.1028	0.1024	0.1032
Standard 5	2.000	0.93	0.1384	0.1375	0.1393



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates	
113	0.508	0.29	0.0347	0.0348	0.0346
114	0.195	13.37	0.0129	0.0117	0.0141
114	0.519	0.18	0.0354	0.0354	0.0355
115	0.453	0.65	0.0309	0.0307	0.0310
116	0.443	0.63	0.0301	0.0300	0.0303
118	0.431	0.80	0.0293	0.0295	0.0291
121	0.427	3.76	0.0290	0.0298	0.0282
127	0.480	0.58	0.0327	0.0326	0.0328
132	0.410	1.21	0.0278	0.0276	0.0281

Figura 2.7 b Gráfica de calibración para Magnesio y ejemplos de lecturas de algunas muestras.

## CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Tratamiento de los datos

Los datos que proporcionan el Cromatógrafo de Líquidos y el Espectrofotómetro de Absorción Atómica, están dados en mg/L (Tablas 3.1 a - 3.1 h).

En estas tablas los números en *itálicas* corresponden a valores que están por debajo o por arriba de los puntos del intervalo de la gráfica de calibración correspondiente.

Para la conversión de estos datos a mg, se multiplicaron por el volumen de aforo 0.005 L.

El flujo y tiempo de muestreo fueron de 30 L/min y 24 horas, entonces los datos los podemos convertir a unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , que son las unidades que se utilizan para este tipo de estudios (Tablas 3.2 a- 3.2 h).

**Tablas 3.1** Resultados de concentración de iones, para cada etapa del MOUDI, en mg/L, en aerosoles colectados en el 2003.

SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L							
0.18* (1)	0.32* (2)	0.56* (3)	1.0* (4)	1.8* (5)	3.2* (6)	5.6* (7)	10.0* (8)
2.161	4.727	1.325	1.185	1.161	0.516	0.424	0.323
1.563	3.615	1.040	1.323	1.042	0.463	0.526	0.421
2.206	4.108	1.247	1.240	1.091	0.542	0.413	0.282
2.160	5.323	1.452	1.326	1.108	0.411	0.442	0.467
1.843	4.322	1.169	1.215	1.124	0.519	0.524	0.324
1.068	3.121	1.684	1.423	1.120	0.416	0.409	0.454
2.404	4.185	1.043	1.024	1.023	0.536	0.532	0.328
1.214	3.840	1.763	1.416	1.042	0.512	0.412	0.456
1.966	4.323	1.971	1.098	1.108	0.506	0.541	0.352
2.360	3.287	1.126	1.368	1.166	0.412	0.472	0.224
2.486	3.446	1.762	1.241	1.108	0.408	0.523	0.460
2.443	3.215	1.224	1.373	1.127	0.538	0.439	0.420
2.923	4.414	1.832	1.066	1.086	0.536	0.415	0.232
1.440	4.561	1.217	1.346	1.160	0.413	0.442	0.442
1.224	5.024	1.218	1.046	1.213	0.506	0.408	0.404
2.342	4.522	1.756	1.202	1.128	0.504	0.411	0.243
2.204	5.082	1.041	1.173	1.164	0.534	0.421	0.331
1.514	4.720	1.148	1.446	1.102	0.529	0.412	0.438
1.563	3.254	1.422	1.082	1.200	0.516	0.427	0.414
2.612	3.815	1.162	1.317	1.068	0.441	0.518	0.334
2.962	4.528	1.480	1.238	1.160	0.505	0.522	0.206
2.506	4.324	1.200	1.156	1.308	0.524	0.461	0.402
1.907	3.641	1.204	1.328	1.216	0.542	0.502	0.436
1.660	3.523	1.048	1.320	1.270	0.528	0.429	0.336
2.014	4.269	1.104	1.362	1.184	0.514	0.542	0.312
1.204	4.692	1.020	1.244	1.072	0.415	0.417	0.432
2.819	4.482	1.811	1.296	1.109	0.526	0.416	0.442
2.040	3.287	1.628	1.048	1.103	0.504	0.441	0.364
1.560	3.418	1.886	1.363	1.082	0.419	0.517	0.308
2.084	3.828	1.720	1.415	1.032	0.584	0.404	0.331
1.834	5.125	1.098	1.412	1.204	0.417	0.501	0.328
1.206	4.048	1.160	1.046	1.216	0.511	0.443	0.332
2.085	3.242	1.373	1.102	1.160	0.448	0.504	0.441
1.614	4.234	1.645	1.278	1.122	0.524	0.411	0.431
2.828	4.681	1.412	1.104	1.066	0.508	0.462	0.354
1.280	4.642	1.240	1.242	1.254	0.506	0.526	0.438
1.753	4.126	1.514	1.065	1.091	0.442	0.471	0.456
1.218	3.640	1.807	1.268	1.056	0.501	0.429	0.317
2.522	4.231	1.816	1.124	1.208	0.502	0.472	0.392
2.720	5.042	1.720	1.262	1.014	0.538	0.524	0.461

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.  
Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 a** Resultados obtenidos de las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L							
0.18* (1)	0.32* (2)	0.56* (3)	1.0* (4)	1.8* (5)	3.2* (6)	5.6* (7)	10.0* (8)
1.224	1.524	1.102	0.841	0.478	0.422	0.318	0.311
0.946	1.762	0.744	0.814	0.514	0.322	0.316	0.319
1.308	1.564	1.011	0.916	0.517	0.482	0.406	0.321
1.021	1.742	0.748	0.963	0.416	0.407	0.478	0.328
1.562	1.482	0.804	0.752	0.432	0.422	0.416	0.321
1.103	1.371	0.815	0.874	0.422	0.426	0.332	0.332
1.123	1.716	0.796	0.921	0.466	0.314	0.312	0.318
1.434	1.606	0.893	0.824	0.508	0.432	0.461	0.314
1.361	1.878	1.017	1.104	0.479	0.356	0.424	0.328
1.161	1.727	1.194	1.012	0.544	0.417	0.382	0.354
1.254	1.608	1.042	0.981	0.432	0.364	0.462	0.350
1.160	1.468	1.026	0.812	0.463	0.406	0.466	0.342
1.626	1.523	0.922	0.824	0.512	0.414	0.446	0.321
1.216	1.609	1.123	0.960	0.426	0.382	0.414	0.320
1.326	1.614	1.021	1.022	0.446	0.427	0.407	0.329
1.108	1.828	1.064	0.823	0.420	0.428	0.323	0.352
1.129	1.960	1.051	0.976	0.452	0.461	0.456	0.327
1.008	1.788	1.237	0.698	0.474	0.320	0.442	0.330
1.022	1.841	1.168	0.766	0.422	0.352	0.412	0.321
1.201	1.543	1.104	1.040	0.508	0.330	0.311	0.340
1.256	1.407	1.205	0.765	0.424	0.422	0.418	0.321
1.251	1.482	1.144	0.828	0.432	0.408	0.454	0.321
1.028	1.708	1.178	1.000	0.465	0.446	0.414	0.346
1.408	1.763	1.012	0.712	0.602	0.412	0.485	0.310
1.006	1.520	0.846	0.511	0.450	0.477	0.472	0.315
1.232	1.882	1.108	0.468	0.428	0.412	0.431	0.318
1.342	1.636	1.066	0.632	0.504	0.416	0.462	0.322
1.264	1.562	1.016	0.568	0.428	0.424	0.493	0.362
1.482	1.608	1.163	0.618	0.476	0.446	0.442	0.316
1.417	1.681	1.102	0.590	0.573	0.428	0.314	0.376
1.210	1.412	1.085	0.472	0.534	0.412	0.428	0.392
1.084	1.852	1.103	0.804	0.452	0.328	0.421	0.315
1.602	1.527	1.031	0.526	0.438	0.412	0.346	0.372
1.044	1.856	1.096	0.494	0.563	0.453	0.418	0.322
1.106	1.683	1.118	0.532	0.462	0.404	0.436	0.321
1.048	1.638	1.013	1.100	0.511	0.424	0.374	0.322
1.242	1.591	1.024	1.024	0.448	0.472	0.462	0.320
1.216	1.852	1.002	0.804	0.564	0.326	0.361	0.322
1.320	1.872	1.014	0.960	0.528	0.430	0.324	0.325
1.419	1.729	1.020	0.801	0.422	0.438	0.310	0.327

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.  
 Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 b** Resultados obtenidos de las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

Cl <sup>-</sup> mg/L							
<b>0.18* (1)</b>	<b>0.32* (2)</b>	<b>0.56* (3)</b>	<b>1.0* (4)</b>	<b>1.8* (5)</b>	<b>3.2* (6)</b>	<b>5.6* (7)</b>	<b>10.0* (8)</b>
0.081	0.201	0.261	0.341	0.522	0.604	0.813	0.721
0.065	0.184	0.281	0.347	0.516	0.606	0.985	0.747
0.169	0.203	0.260	0.343	0.565	0.604	0.986	0.727
0.161	0.166	0.266	0.372	0.626	0.663	0.921	0.761
0.065	0.164	0.228	0.467	0.544	0.646	0.842	0.783
0.171	0.212	0.238	0.326	0.523	0.621	0.817	0.706
0.078	0.224	0.264	0.441	0.541	0.661	0.851	0.782
0.127	0.213	0.244	0.422	0.568	0.686	0.953	0.786
0.156	0.165	0.274	0.423	0.526	0.649	0.905	0.709
0.121	0.183	0.263	0.458	0.542	0.661	0.819	0.794
0.116	0.225	0.318	0.464	0.568	0.602	0.824	0.745
0.164	0.184	0.265	0.432	0.526	0.663	0.925	0.662
0.123	0.224	0.322	0.442	0.536	0.583	0.866	0.769
0.145	0.215	0.354	0.440	0.517	0.567	0.822	0.781
0.128	0.181	0.361	0.419	0.541	0.623	0.914	0.793
0.153	0.220	0.341	0.427	0.546	0.619	0.963	0.684
0.121	0.264	0.242	0.407	0.542	0.617	0.827	0.652
0.105	0.145	0.268	0.463	0.612	0.618	0.957	0.721
0.112	0.147	0.326	0.367	0.527	0.606	0.956	0.764
0.074	0.218	0.262	0.461	0.562	0.617	0.841	0.643
0.087	0.228	0.217	0.424	0.586	0.606	0.939	0.726
0.123	0.198	0.264	0.389	0.578	0.643	0.924	0.645
0.119	0.145	0.346	0.342	0.583	0.581	0.853	0.631
0.162	0.243	0.342	0.416	0.549	0.628	0.904	0.755
0.165	0.205	0.238	0.423	0.544	0.614	0.876	0.647
0.141	0.209	0.269	0.343	0.512	0.558	0.935	0.758
0.163	0.204	0.286	0.445	0.532	0.603	0.887	0.703
0.058	0.207	0.348	0.422	0.561	0.623	0.908	0.756
0.126	0.208	0.259	0.425	0.564	0.560	0.944	0.654
0.156	0.214	0.365	0.382	0.554	0.562	0.886	0.764
0.164	0.221	0.342	0.458	0.512	0.605	0.816	0.683
0.162	0.181	0.274	0.471	0.605	0.625	0.857	0.759
0.121	0.229	0.317	0.348	0.547	0.607	0.834	0.771
0.067	0.166	0.265	0.443	0.543	0.622	0.811	0.676
0.118	0.241	0.352	0.426	0.514	0.608	0.817	0.669
0.084	0.227	0.321	0.447	0.529	0.603	0.827	0.641
0.124	0.245	0.303	0.421	0.567	0.615	0.918	0.714
0.146	0.263	0.345	0.454	0.545	0.652	0.958	0.646
0.166	0.176	0.382	0.482	0.567	0.661	0.862	0.721
0.143	0.167	0.323	0.346	0.633	0.664	0.842	0.764

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI. Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 c** Resultados obtenidos de las concentraciones de Cl<sup>-</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

Na <sup>+</sup> mg/L							
<b>0.18* (1)</b>	<b>0.32* (2)</b>	<b>0.56* (3)</b>	<b>1.0* (4)</b>	<b>1.8* (5)</b>	<b>3.2* (6)</b>	<b>5.6* (7)</b>	<b>10.0* (8)</b>
0.218	0.304	0.313	0.366	0.545	0.831	1.023	0.769
0.241	0.284	0.408	0.652	0.586	0.767	1.161	0.687
0.227	0.265	0.244	0.424	0.448	0.915	1.200	0.664
0.223	0.243	0.421	0.456	0.427	0.912	1.186	0.625
0.246	0.251	0.281	0.405	0.621	0.785	1.925	0.721
0.229	0.243	0.481	0.505	0.441	0.812	1.412	0.964
0.234	0.382	0.462	0.487	0.527	0.836	1.567	0.982
0.161	0.329	0.363	0.365	0.524	0.786	1.423	0.843
0.182	0.262	0.429	0.462	0.632	0.907	1.104	0.887
0.163	0.306	0.414	0.384	0.521	0.985	1.169	0.686
0.146	0.325	0.563	0.428	0.518	0.771	1.408	0.787
0.247	0.215	0.442	0.526	0.663	0.816	1.617	0.963
0.244	0.287	0.512	0.528	0.544	0.804	1.324	0.965
0.221	0.303	0.424	0.327	0.462	0.906	1.919	0.944
0.183	0.368	0.426	0.343	0.526	0.809	1.783	0.927
0.205	0.244	0.324	0.487	0.627	0.786	1.824	0.822
0.162	0.341	0.421	0.544	0.445	0.908	1.184	0.623
0.249	0.247	0.387	0.507	0.642	0.798	1.251	0.727
0.185	0.229	0.523	0.561	0.486	0.726	1.864	0.526
0.226	0.385	0.466	0.586	0.621	0.791	1.067	0.568
0.181	0.284	0.433	0.344	0.606	0.934	1.548	0.842
0.227	0.246	0.524	0.568	0.464	0.791	1.183	0.767
0.225	0.322	0.582	0.567	0.483	0.826	1.415	0.765
0.243	0.306	0.383	0.381	0.561	0.823	1.646	0.686
0.164	0.269	0.402	0.544	0.542	0.921	1.847	0.663
0.225	0.307	0.385	0.645	0.475	0.807	1.962	0.645
0.226	0.200	0.387	0.522	0.522	0.920	1.325	0.829
0.261	0.325	0.427	0.374	0.663	0.856	1.085	0.683
0.187	0.308	0.279	0.445	0.512	0.764	1.486	0.741
0.205	0.365	0.389	0.376	0.543	0.842	1.667	0.763
0.226	0.287	0.443	0.325	0.613	0.782	1.169	0.841
0.263	0.286	0.383	0.444	0.489	0.945	1.145	0.845
0.185	0.242	0.466	0.426	0.625	0.806	1.251	0.712
0.244	0.283	0.544	0.427	0.554	0.912	1.424	0.924
0.224	0.287	0.481	0.525	0.446	0.869	1.235	0.848
0.184	0.283	0.444	0.368	0.541	0.805	1.150	0.921
0.341	0.248	0.468	0.332	0.623	0.762	1.084	0.845
0.245	0.286	0.384	0.322	0.425	0.966	1.066	0.947
0.224	0.367	0.369	0.387	0.525	0.901	0.849	0.846
0.227	0.364	0.434	0.446	0.562	0.763	0.783	0.943

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.  
Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI..

**Tabla 3.1 d** Resultados obtenidos de las concentraciones de Na<sup>+</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L							
<b>0.18* (1)</b>	<b>0.32* (2)</b>	<b>0.56* (3)</b>	<b>1.0* (4)</b>	<b>1.8* (5)</b>	<b>3.2* (6)</b>	<b>5.6* (7)</b>	<b>10.0* (8)</b>
0.562	1.024	0.566	0.556	0.344	0.255	0.218	0.126
0.804	0.946	0.729	0.475	0.218	0.178	0.203	0.101
0.556	0.963	0.516	0.424	0.332	0.196	0.212	0.124
0.729	1.061	0.508	0.524	0.234	0.222	0.132	0.107
0.762	1.087	0.502	0.428	0.308	0.246	0.136	0.145
0.724	1.016	0.512	0.582	0.334	0.297	0.204	0.113
0.662	1.101	0.452	0.409	0.236	0.128	0.136	0.182
0.609	1.056	0.408	0.359	0.253	0.168	0.138	0.166
0.633	1.084	0.614	0.546	0.219	0.204	0.132	0.108
0.715	1.023	0.438	0.509	0.361	0.327	0.174	0.125
0.653	1.046	0.722	0.523	0.245	0.205	0.172	0.144
0.574	0.916	0.734	0.512	0.208	0.230	0.215	0.178
0.532	1.011	0.702	0.416	0.262	0.237	0.164	0.126
0.566	1.082	0.576	0.441	0.414	0.292	0.188	0.161
0.734	1.008	0.708	0.526	0.234	0.174	0.216	0.114
0.628	1.017	0.682	0.441	0.304	0.138	0.170	0.165
0.525	1.002	0.518	0.422	0.411	0.202	0.104	0.102
0.576	0.942	0.447	0.525	0.416	0.186	0.206	0.154
0.616	1.014	0.478	0.562	0.182	0.218	0.124	0.129
0.446	1.002	0.542	0.448	0.325	0.167	0.126	0.116
0.663	0.902	0.491	0.515	0.406	0.172	0.116	0.106
0.709	1.016	0.761	0.517	0.422	0.323	0.212	0.108
0.564	1.025	0.532	0.572	0.237	0.178	0.168	0.114
0.646	0.917	0.437	0.526	0.164	0.201	0.121	0.134
0.764	1.046	0.426	0.442	0.147	0.118	0.146	0.127
0.628	1.016	0.483	0.517	0.132	0.126	0.156	0.112
0.448	1.049	0.616	0.544	0.124	0.247	0.119	0.152
0.412	1.084	0.414	0.452	0.209	0.312	0.138	0.105
0.548	1.042	0.559	0.507	0.305	0.164	0.152	0.102
0.493	1.094	0.637	0.556	0.233	0.152	0.184	0.118
0.456	1.018	0.448	0.438	0.209	0.198	0.172	0.110
0.706	1.028	0.436	0.408	0.117	0.246	0.136	0.114
0.534	1.112	0.534	0.552	0.128	0.216	0.165	0.136
0.461	1.013	0.496	0.508	0.118	0.176	0.132	0.132
0.725	1.002	0.428	0.583	0.162	0.196	0.162	0.116
0.582	0.764	0.345	0.518	0.206	0.136	0.136	0.172
0.624	0.923	0.343	0.568	0.154	0.214	0.214	0.106
0.608	1.124	0.443	0.563	0.166	0.163	0.122	0.156
0.966	0.676	0.642	0.528	0.124	0.266	0.218	0.165
0.544	0.868	0.327	0.554	0.156	0.125	0.161	0.117

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.  
Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 e** Resultados obtenidos de las concentraciones de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

K <sup>+</sup> mg/L							
0.18* (1)	0.32* (2)	0.56* (3)	1.0* (4)	1.8* (5)	3.2* (6)	5.6* (7)	10.0* (8)
0.944	2.030	1.048	0.656	0.566	0.563	0.430	0.124
0.932	2.051	0.668	0.723	0.562	0.612	0.226	0.284
0.810	1.242	0.736	0.527	0.482	0.464	0.414	0.259
0.836	1.571	1.086	0.682	0.442	0.583	0.268	0.210
0.723	1.492	0.790	0.968	0.562	0.486	0.235	0.304
0.828	2.122	0.724	0.572	0.486	0.492	0.308	0.130
0.852	1.696	1.130	0.694	0.618	0.524	0.281	0.222
0.932	1.452	0.692	0.728	0.530	0.525	0.416	0.246
0.714	1.484	0.816	0.630	0.513	0.521	0.464	0.324
0.711	1.692	0.751	0.724	0.438	0.501	0.290	0.215
1.016	1.242	0.664	0.712	0.518	0.511	0.258	0.272
0.691	1.638	1.046	0.754	0.512	0.469	0.206	0.284
0.972	2.016	0.830	0.574	0.421	0.512	0.218	0.233
0.730	2.028	1.052	0.664	0.630	0.510	0.423	0.287
0.862	2.208	0.710	0.712	0.494	0.474	0.308	0.194
0.972	2.136	0.814	0.652	0.579	0.572	0.221	0.342
0.694	2.166	0.664	0.642	0.563	0.464	0.362	0.214
0.824	1.496	0.884	0.770	0.538	0.526	0.413	0.308
0.909	1.224	0.810	0.572	0.543	0.574	0.403	0.228
0.966	1.243	0.798	0.654	0.457	0.548	0.308	0.382
0.876	1.366	1.058	0.741	0.528	0.518	0.338	0.244
0.850	2.018	0.756	0.621	0.690	0.541	0.286	0.221
0.876	1.921	0.852	0.702	0.430	0.436	0.398	0.248
0.984	1.630	1.012	0.710	0.692	0.560	0.286	0.371
0.702	2.052	0.698	0.646	0.452	0.509	0.315	0.212
0.852	1.248	1.006	0.522	0.486	0.532	0.322	0.230
0.746	1.356	0.730	0.645	0.648	0.487	0.368	0.282
0.726	1.336	0.686	0.602	0.440	0.470	0.290	0.284
0.909	1.956	0.746	0.848	0.608	0.668	0.402	0.216
0.684	2.046	0.715	0.618	0.451	0.529	0.315	0.312
0.748	2.025	0.691	0.596	0.628	0.453	0.288	0.234
0.728	1.846	0.768	0.622	0.671	0.553	0.236	0.219
0.812	1.450	1.136	0.632	0.516	0.514	0.264	0.174
0.764	1.328	0.748	0.510	0.602	0.513	0.304	0.238
0.692	1.428	0.726	0.598	0.628	0.456	0.292	0.258
0.846	1.222	0.770	0.508	0.597	0.489	0.406	0.229
1.010	1.568	0.886	0.554	0.586	0.504	0.344	0.314
0.749	1.926	0.772	0.854	0.631	0.486	0.358	0.243
1.004	1.702	1.036	0.691	0.444	0.568	0.318	0.226
0.988	1.444	0.886	0.724	0.516	0.601	0.332	0.330

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI. Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 f** Resultados obtenidos de las concentraciones de K<sup>+</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

Ca <sup>2+</sup> mg/L							
<b>0.18* (1)</b>	<b>0.32* (2)</b>	<b>0.56* (3)</b>	<b>1.0* (4)</b>	<b>1.8* (5)</b>	<b>3.2* (6)</b>	<b>5.6* (7)</b>	<b>10.0* (8)</b>
0.013	0.023	0.024	0.053	0.053	0.127	0.257	0.211
0.010	0.021	0.025	0.042	0.066	0.126	0.214	0.096
0.014	0.014	0.038	0.050	0.052	0.113	0.252	0.217
0.011	0.021	0.029	0.068	0.063	0.129	0.221	0.201
0.016	0.019	0.026	0.058	0.054	0.116	0.301	0.213
0.018	0.026	0.032	0.062	0.057	0.161	0.187	0.118
0.015	0.032	0.036	0.064	0.065	0.084	0.261	0.115
0.016	0.022	0.033	0.061	0.078	0.127	0.232	0.193
0.010	0.017	0.031	0.066	0.074	0.154	0.304	0.126
0.017	0.024	0.029	0.055	0.086	0.158	0.218	0.122
0.010	0.016	0.037	0.063	0.068	0.107	0.312	0.092
0.010	0.015	0.027	0.046	0.067	0.116	0.238	0.177
0.010	0.027	0.029	0.049	0.091	0.211	0.206	0.124
0.010	0.026	0.032	0.061	0.083	0.109	0.214	0.115
0.012	0.019	0.042	0.050	0.051	0.205	0.226	0.114
0.010	0.028	0.043	0.065	0.062	0.142	0.123	0.112
0.010	0.031	0.031	0.053	0.079	0.088	0.202	0.108
0.010	0.031	0.037	0.040	0.054	0.112	0.216	0.115
0.015	0.029	0.028	0.067	0.052	0.161	0.321	0.108
0.013	0.027	0.027	0.054	0.063	0.075	0.251	0.102
0.010	0.025	0.039	0.036	0.092	0.216	0.226	0.117
0.021	0.014	0.036	0.041	0.087	0.142	0.119	0.126
0.010	0.030	0.025	0.054	0.082	0.122	0.257	0.141
0.010	0.014	0.028	0.048	0.064	0.084	0.231	0.106
0.018	0.026	0.038	0.052	0.057	0.112	0.227	0.102
0.010	0.018	0.035	0.057	0.079	0.131	0.357	0.136
0.011	0.028	0.024	0.038	0.075	0.116	0.311	0.116
0.010	0.026	0.034	0.062	0.068	0.094	0.127	0.108
0.022	0.022	0.032	0.051	0.081	0.093	0.316	0.168
0.010	0.018	0.033	0.060	0.082	0.090	0.126	0.129
0.010	0.010	0.035	0.069	0.053	0.083	0.214	0.154
0.010	0.011	0.036	0.041	0.076	0.076	0.196	0.101
0.012	0.019	0.030	0.051	0.071	0.093	0.243	0.096
0.010	0.010	0.029	0.056	0.075	0.077	0.241	0.083
0.010	0.025	0.036	0.059	0.068	0.095	0.229	0.081
0.010	0.012	0.034	0.064	0.062	0.064	0.221	0.176
0.010	0.027	0.019	0.049	0.056	0.098	0.212	0.087
0.012	0.012	0.036	0.056	0.063	0.097	0.245	0.166
0.010	0.010	0.031	0.045	0.067	0.079	0.271	0.095
0.010	0.024	0.037	0.047	0.085	0.094	0.152	0.073

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI. Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 g** Resultados obtenidos de las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

Mg <sup>2+</sup> mg/L							
<b>0.18* (1)</b>	<b>0.32* (2)</b>	<b>0.56* (3)</b>	<b>1.0* (4)</b>	<b>1.8* (5)</b>	<b>3.2* (6)</b>	<b>5.6* (7)</b>	<b>10.0* (8)</b>
0.037	0.052	0.106	0.119	0.151	0.316	0.633	0.361
0.045	0.073	0.097	0.106	0.161	0.242	0.432	0.484
0.047	0.054	0.141	0.116	0.181	0.254	0.725	0.383
0.056	0.058	0.084	0.124	0.101	0.231	0.572	0.361
0.021	0.049	0.097	0.152	0.122	0.277	0.610	0.351
0.053	0.075	0.069	0.171	0.131	0.296	0.746	0.501
0.046	0.059	0.088	0.163	0.159	0.226	0.692	0.482
0.040	0.078	0.087	0.084	0.128	0.301	0.511	0.351
0.036	0.063	0.093	0.109	0.137	0.256	0.597	0.342
0.020	0.077	0.091	0.105	0.183	0.271	0.582	0.511
0.050	0.039	0.092	0.206	0.191	0.264	0.645	0.356
0.018	0.034	0.097	0.085	0.116	0.317	0.683	0.361
0.026	0.073	0.088	0.181	0.106	0.257	0.406	0.414
0.013	0.049	0.095	0.173	0.141	0.315	0.568	0.402
0.042	0.035	0.080	0.083	0.144	0.281	0.527	0.462
0.049	0.050	0.084	0.087	0.140	0.279	0.733	0.374
0.023	0.029	0.191	0.099	0.133	0.302	0.655	0.302
0.057	0.062	0.086	0.075	0.175	0.261	0.641	0.433
0.035	0.058	0.125	0.126	0.120	0.295	0.607	0.352
0.039	0.072	0.102	0.084	0.131	0.238	0.521	0.336
0.026	0.070	0.093	0.180	0.167	0.298	0.553	0.432
0.052	0.057	0.134	0.111	0.148	0.259	0.537	0.362
0.050	0.062	0.110	0.070	0.165	0.265	0.767	0.314
0.054	0.066	0.081	0.073	0.105	0.295	0.638	0.402
0.013	0.073	0.077	0.064	0.140	0.220	0.419	0.314
0.043	0.061	0.094	0.081	0.135	0.266	0.794	0.331
0.020	0.064	0.086	0.164	0.141	0.285	0.753	0.543
0.049	0.072	0.060	0.067	0.131	0.296	0.788	0.475
0.036	0.056	0.087	0.092	0.132	0.247	0.536	0.398
0.056	0.050	0.085	0.086	0.154	0.251	0.825	0.396
0.049	0.047	0.063	0.076	0.201	0.256	0.608	0.392
0.036	0.037	0.067	0.083	0.152	0.229	0.622	0.254
0.023	0.043	0.082	0.102	0.127	0.270	0.558	0.327
0.064	0.059	0.064	0.086	0.124	0.265	0.612	0.392
0.031	0.033	0.063	0.081	0.162	0.269	0.579	0.429
0.035	0.042	0.078	0.104	0.227	0.248	0.692	0.437
0.039	0.033	0.074	0.067	0.131	0.243	0.565	0.492
0.053	0.058	0.062	0.075	0.137	0.294	0.615	0.633
0.045	0.054	0.073	0.076	0.141	0.249	0.569	0.562
0.031	0.058	0.071	0.073	0.159	0.302	0.626	0.436

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.  
 Los números en paréntesis son las etapas en el MOUDI.

**Tabla 3.1 h** Resultados obtenidos de las concentraciones de Mg<sup>2+</sup> en las ocho etapas del MOUDI.

**Tablas 3.2** Concentración promedio, máximos, mínimos, desviación estándar en mg/L y concentraciones promedio en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en cada una de las etapas del MOUDI, de los iones, en aerosoles colectados en febrero y marzo de 2003.

<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	1.988	4.148	1.412	1.240	1.132	0.493	0.463	0.372
Máximo (mg/L)	2.962	5.323	1.971	1.446	1.308	0.584	0.542	0.467
Mínimo (mg/L)	1.068	3.121	1.020	1.024	1.014	0.408	0.404	0.206
Desv est (mg/L)	0.544	0.611	0.297	0.126	0.070	0.048	0.048	0.073
Concentración Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.230	0.480	0.163	0.143	0.131	0.057	0.054	0.043

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.

**Tabla 3.2 a**

<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	1.232	1.660	1.031	0.803	0.476	0.407	0.406	0.331
Máximo (mg/L)	1.626	1.960	1.237	1.104	0.602	0.482	0.493	0.392
Mínimo (mg/L)	0.946	1.371	0.744	0.468	0.416	0.314	0.310	0.310
Desv est (mg/L)	0.171	0.152	0.125	0.185	0.050	0.045	0.058	0.019
Concentración Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.143	0.192	0.119	0.093	0.055	0.047	0.047	0.038

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.

**Tabla 3.2 b**

<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedi (mg/L)	0.126	0.203	0.295	0.414	0.552	0.619	0.885	0.720
Máximo (mg/L)	0.171	0.264	0.382	0.482	0.633	0.686	0.986	0.794
Mínimo (mg/L)	0.058	0.145	0.217	0.326	0.512	0.558	0.811	0.631
Desv est (mg/L)	0.034	0.031	0.045	0.044	0.030	0.031	0.055	0.051
Concentración Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.015	0.023	0.034	0.048	0.064	0.072	0.102	0.083

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.

**Tabla 3.2 c**

<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	0.217	0.292	0.423	0.453	0.540	0.841	1.368	0.793
Máximo (mg/L)	0.341	0.385	0.582	0.652	0.663	0.985	1.962	0.982
Mínimo (mg/L)	0.146	0.200	0.244	0.322	0.425	0.726	0.783	0.526
Desv est (mg/L)	0.036	0.047	0.074	0.091	0.069	0.066	0.308	0.122
Concentración Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.025	0.034	0.049	0.052	0.062	0.097	0.158	0.092

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en  $\mu\text{m}$  en el MOUDI.

**Tabla 3.2 d**

<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	0.617	1.003	0.529	0.500	0.244	0.205	0.163	0.130
Máximo (mg/L)	0.966	1.124	0.761	0.583	0.422	0.327	0.218	0.182
Mínimo (mg/L)	0.412	0.676	0.327	0.359	0.117	0.118	0.104	0.101
Desv est (mg/L)	0.113	0.089	0.116	0.058	0.094	0.055	0.035	0.024
Concentración Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	0.071	0.116	0.061	0.058	0.028	0.024	0.019	0.015

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en µm en el MOUDI.

**Tabla 3.2 e**

<b>K<sup>+</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	0.837	1.677	0.835	0.664	0.542	0.520	0.323	0.254
Máximo (mg/L)	1.016	2.208	1.136	0.968	0.692	0.668	0.464	0.382
Mínimo (mg/L)	0.684	1.222	0.664	0.508	0.421	0.436	0.206	0.124
Desv est (mg/L)	0.107	0.325	0.146	0.096	0.077	0.048	0.067	0.056
Concentración Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	0.097	0.194	0.097	0.077	0.063	0.060	0.037	0.029

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en µm en el MOUDI.

**Tabla 3.2 f**

<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	0.012	0.021	0.032	0.054	0.069	0.117	0.232	0.129
Máximo (mg/L)	0.022	0.032	0.043	0.069	0.092	0.216	0.357	0.217
Mínimo (mg/L)	0.010	0.010	0.019	0.036	0.051	0.064	0.119	0.073
Desv est (mg/L)	0.003	0.007	0.005	0.009	0.012	0.037	0.055	0.039
Concentración Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.014	0.027	0.015

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en µm en el MOUDI.

**Tabla 3.2 g**

<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>
Promedio (mg/L)	0.039	0.056	0.090	0.107	0.146	0.270	0.619	0.406
Máximo (mg/L)	0.064	0.078	0.191	0.206	0.227	0.317	0.825	0.633
Mínimo (mg/L)	0.013	0.029	0.060	0.064	0.101	0.220	0.406	0.254
Desv est (mg/L)	0.013	0.014	0.024	0.038	0.026	0.026	0.100	0.078
Concentración Promedio (µg/m <sup>3</sup> )	0.005	0.006	0.010	0.012	0.017	0.031	0.072	0.047

\*Los números en negritas corresponden a diámetros aerodinámicos expresados en µm en el MOUDI.

**Tabla 3.2 h**

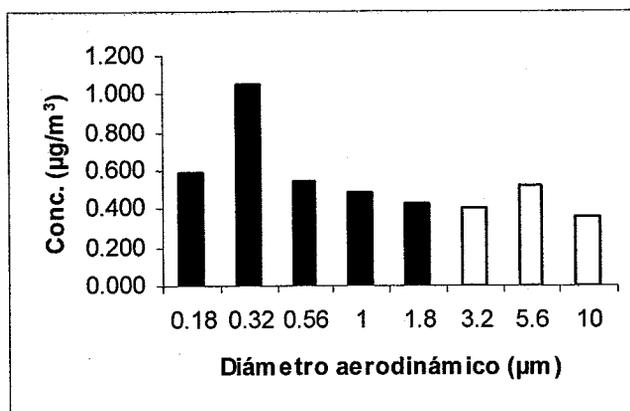
La tabla 3.3, nos muestra las concentraciones promedio de los cuarenta días de muestreo de cada uno de los ocho iones cuantificados, en función de los diámetros aerodinámicos que presenta el MOUDI, además nos muestra la concentración total de iones para cada etapa del MOUDI en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

iones	<b>0.18*</b>	<b>0.32*</b>	<b>0.56*</b>	<b>1.0*</b>	<b>1.8*</b>	<b>3.2*</b>	<b>5.6*</b>	<b>10.0*</b>	suma
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.230	0.480	0.163	0.143	0.131	0.057	0.054	0.043	1.302
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.143	0.192	0.119	0.093	0.055	0.047	0.047	0.038	0.734
$\text{Cl}^-$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.015	0.023	0.034	0.048	0.064	0.072	0.102	0.083	0.441
$\text{Na}^+$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.025	0.034	0.049	0.052	0.062	0.097	0.158	0.092	0.570
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.071	0.116	0.061	0.058	0.028	0.024	0.019	0.015	0.392
$\text{K}^+$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.097	0.194	0.097	0.077	0.063	0.060	0.037	0.029	0.654
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.014	0.027	0.015	0.077
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.005	0.006	0.010	0.012	0.017	0.031	0.072	0.047	0.200
Concentración total promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.587	1.049	0.538	0.490	0.428	0.402	0.516	0.363	4.372

\*Los números en negritas corresponden al diámetro aerodinámico ( $\mu\text{m}$ ) en el MOUDI.

**Tabla 3.3** Concentraciones totales en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , de los iones determinados en función del diámetro aerodinámico ( $\mu\text{m}$ ).

Esta tabla nos sirve para elaborar la siguiente gráfica (figura 3.1) y poder determinar la cantidad de partículas presentes en fracción fina y fracción gruesa, de acuerdo al diámetro aerodinámico.



**Figura 3.1** Distribución de la suma total de iones en fracción fina (barras oscuras) y fracción gruesa (barras blancas).

En esta figura podemos diferenciar dos tipos de fracciones, una que representa a la fracción fina (diámetro aerodinámico entre 0.18 y 1.8 µm) que corresponde al 70.70% de la concentración total de las partículas estudiadas en este trabajo, otra es la fracción gruesa (diámetro aerodinámico entre 3.2 y 10 µm), que representa el 29.30%. Las partículas menores a PM<sub>1</sub> son las más dañinas para la salud debido que estas pueden incluso llegar al torrente sanguíneo. También se observa que en el valor 0.32 µm de diámetro (modo acumulación), se encuentra la mayor cantidad de partículas presentes en la fracción fina y en el valor 5.6 µm de diámetro (modo grueso), corresponde a la mayor cantidad de partículas presentes en la fracción gruesa.

Diversos estudios tanto en ciudades como en sitios rurales, muestran que la mayor concentración de partículas se encuentra en el modo fino, (Cheng y Tsai, 2000; Chen y colaboradores 1997; Hand y colaboradores 2002; Hitzemberger y Tohno, 2001).

También diversos autores encontraron que las partículas se concentran en modos semejantes a los encontrados en este trabajo, como se puede apreciar en las

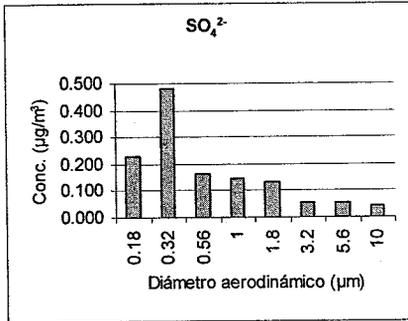
siguientes referencias: Zhuang y Chan 1997, encontraron un modo entre 0.3-0.65  $\mu\text{m}$  (acumulación) y otro en el modo grueso (3-6  $\mu\text{m}$ ), el modo de acumulación se atribuyó a la presencia de constituyentes iónicos como sulfatos y amonio y el modo grueso se atribuyó a los aerosoles generados por componentes crustales, salinos y nitratos.

Chen y colaboradores 1997, encontraron que la distribución de las partículas en un sitio de tránsito vehicular presenta un modo en el intervalo de 0.18-0.32  $\mu\text{m}$  (modo de acumulación), y un segundo modo en las partículas gruesas en el intervalo de 5.6-10  $\mu\text{m}$  (modo grueso), usaron también un impactor de cascada (MOUDI).

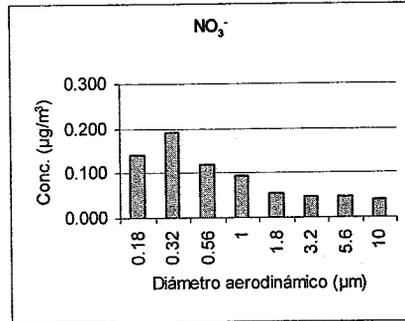
En una distribución típica de tamaño/composición de aerosoles urbanos (John y colaboradores, 1990), encontraron dos modos, en los cuales las especies sulfatos, nitratos y amonio se presentan con mayor frecuencia. En el intervalo de tamaño de partícula entre 0.1 y 1.0  $\mu\text{m}$ , se identifica una primera región denominada "modo de acumulación", donde las partículas son el resultado de la condensación de precursores en fase gas y una segunda región "modo grueso" (4.4  $\mu\text{m}$ ), en la que están presentes, además de sulfato, nitrato y amonio, las especies sodio y cloruro.

En las figuras 3.2 a – 3.2 h, se observan los comportamientos de las concentraciones de cada uno de los iones en las diferentes etapas. También nos muestran que los iones sulfato, nitrato, amonio y potasio presentan un comportamiento similar, es decir, presentan la mayor concentración en el diámetro de 0.32  $\mu\text{m}$  (modo de acumulación) y su mayor contribución en concentración, es en la fracción fina de los aerosoles, en cambio cloruro, sodio, calcio y magnesio presentan su mayor concentración en 5.6  $\mu\text{m}$  de diámetro (modo grueso) y su comportamiento estaría referido a las partículas gruesas.

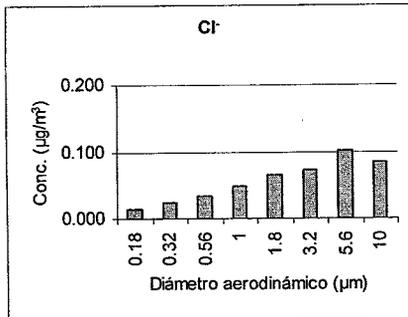
**Figuras 3.2.** Concentración de los iones en función del diámetro aerodinámico, en las ocho etapas.



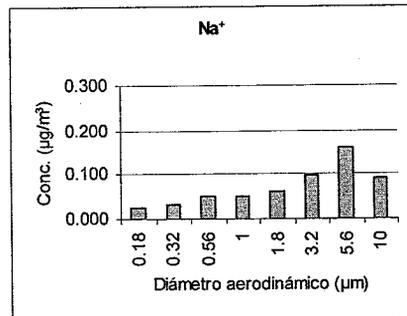
**Figura 3.2 a**



**Figura 3.2 b**



**Figura 3.2 c**



**Figura 3.2 d**

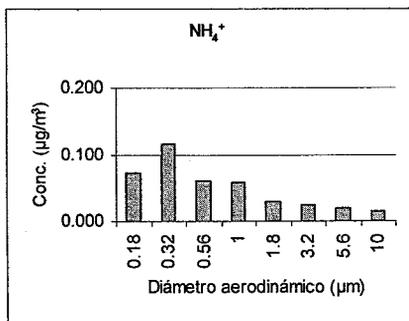


Figura 3.2 e

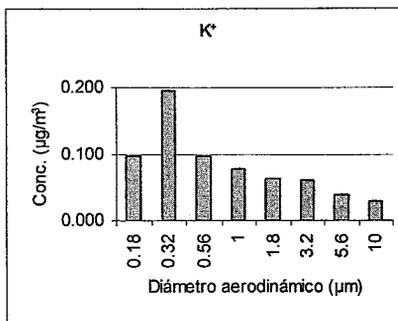


Figura 3.2 f

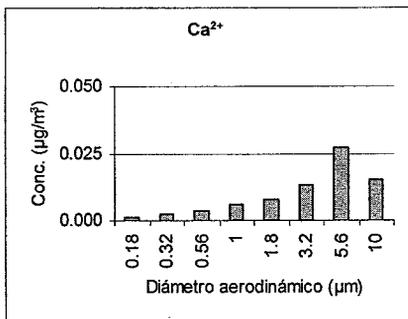


Figura 3.2 g

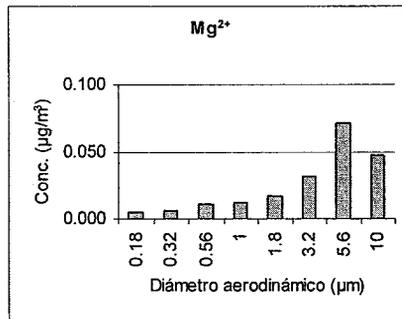


Figura 3.2 h

Discusión de las figuras 3.2:

**Figura 3.2 a**, podemos observar el comportamiento del ion sulfato, el cual presenta su mayor concentración en el diámetro de 0.32 µm (modo de acumulación), este modo se atribuye a reacciones entre sus precursores en fase gas. El sulfato es un marcador de quema de combustibles fósiles o emisiones volcánicas, por lo que su presencia en las partículas, indica que éstas provienen de emisiones antropogénicas y/o emisiones volcánicas.

**Figura 3.2 b**, al igual que los sulfatos, los nitratos se presentan en mayor concentración en el diámetro de  $0.32 \mu\text{m}$ . La presencia de nitratos se debe a las emisiones de vehículos y la quema de gas y también al uso de fertilizantes para la tierra.

**Figura 3.2 c**, el comportamiento del ion cloruro muestra su mayor concentración en el diámetro  $5.6 \mu\text{m}$ , que es un modo representativo de las partículas gruesas. El origen del cloruro es probablemente debido a las emisiones vehiculares y a la quema de compuestos clorados como por ejemplo cloruro de polivinilo.

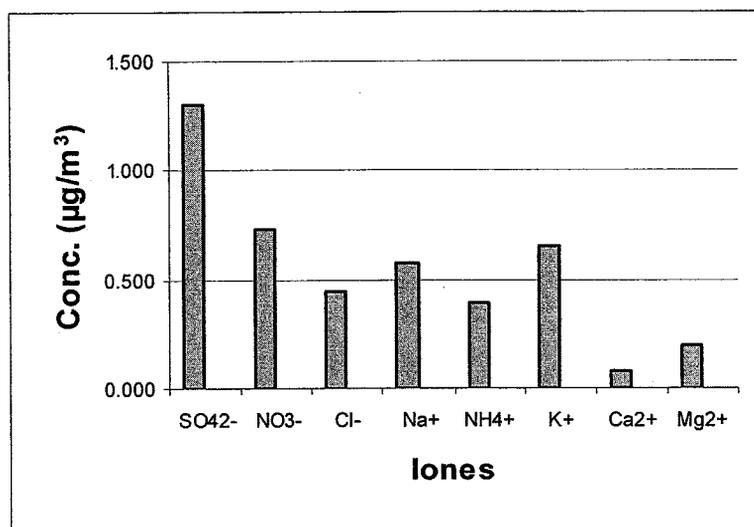
**Figura 3.2 d**, el ion sodio se comporta también como partículas de fracción gruesa, diámetro  $5.6 \mu\text{m}$  cuyo origen se debe principalmente al suelo y probablemente a las sales que de este ion se usan en la industria de elaboración de medicamentos.

**Figura 3.2 e**, el ion amonio presenta una concentración mayor en el diámetro de  $0.32 \mu\text{m}$ , su origen se debe probablemente a procesos biológicos en los seres vivos, por el uso de fertilizantes y por el océano. Cuando el amoniaco se disuelve en agua, éste se protona con el ion hidrógeno, para formar el ion amonio (Jacobson, 2002).

**Figura 3.2 f**, el ion potasio presenta su mayor concentración en el diámetro  $0.32 \mu\text{m}$  y su presencia indica quema de biomasa, (Seinfeld y Pandis, 1998), por lo tanto su probable origen se debió a que ocurrieron incendios, o la presencia de incineradores cerca del lugar de muestreo (Facultad de Medicina y de Veterinaria).

**Figura 3.2 g y 3.2 h**, los iones calcio y magnesio, probablemente su origen sea crustal y su mayor concentración está representada en la fracción gruesa de los aerosoles ( $5.6 \mu\text{m}$ ). En cambio su contribución es pequeña en las partículas finas, como se ha reportado en estudios para la Ciudad de México (Chow y colaboradores, 2002).

En la figura 3.3 se observa que el ion que presenta la mayor concentración promedio fue el  $\text{SO}_4^{2-}$ , seguido por  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y por último el  $\text{Ca}^{2+}$ . En estudios realizados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera en el agua de lluvia, colectada en el 2003, se reportó que el ion más abundante fue precisamente el sulfato (Báez y colaboradores, 2006), lo que confirma la abundancia de los aerosoles de sulfato en la atmósfera. Las especies más abundantes a lo largo del estudio fueron  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ .



**Figura 3.3** Concentración promedio de todas las muestras correspondientes a cada ion.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con nuestros resultados la fracción fina de los aerosoles estudiados en este trabajo esta en mayor cantidad que la fracción gruesa. La fracción fina es la que causa el mayor daño a la salud del ser humano; en México se cuenta con una regulación para medir las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , esta normatividad solo se refiere a su peso y no a la composición química. En cambio no se cuenta con un reglamento para medir las  $PM_1$ , que son las partículas más peligrosas, ya que estas pueden incluso llegar hasta el torrente sanguíneo y son altamente tóxicas, ello ha generado un gran interés, por un lado para identificarlas y por otro, no solo para medir su peso, sino también su composición.

El sulfato es el ion que presenta la mayor concentración durante el análisis hecho en este trabajo, se puede explicar esta mayor concentración, a que en el presente se siguen emitiendo importantes concentraciones de  $SO_2$ , debido a procesos de combustión y de metalurgia (fundiciones), que son actividades antropogénicas; y por otro lado, existen emisiones naturales, como en el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México debido a la actividad del volcán Popocatepetl, específicamente.

En el valor de  $0.32 \mu m$  de diámetro aerodinámico, se presenta la mayor concentración de sulfatos, esto representa que a este valor, corresponde el modo de acumulación que se genera tanto por emisiones primarias, como por emisiones secundarias (reacciones en fase gaseosa). Esta misma situación la presentan los iones nitratos y amonio.

El estudio de análisis de agua de lluvia (colectada en el 2003), realizado en el laboratorio de Química Atmosférica, presentó como resultados que el sulfato, está presente en concentraciones importantes, lo que confirma los resultados obtenidos en aerosoles atmosféricos.

El nitrato y el sulfato tienen origen antropogénico ya que ambos tienen su origen en sus gases precursores,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ .

El amonio, cuyo origen se debe principalmente a procesos biológicos en los seres vivos y al uso de fertilizantes, juega un papel importante debido a que neutraliza a iones como sulfatos y nitratos.

La presencia de potasio nos indica que existe quema de biomasa.

Las especies químicas calcio y magnesio presentan su mayor concentración en el valor de diámetro aerodinámico  $5.6 \mu\text{m}$ , este valor representa procesos mecánicos como erosión del suelo y resuspensión de polvo, es decir que el probable origen de estos aerosoles es crustal.

La presencia de contaminantes atmosféricos en la ciudad, se debe entre otras causas a la alta demanda de combustibles por la población; además las condiciones geográficas de la ciudad, contribuyen a una mayor actividad fotoquímica y acumulación de contaminantes.

## BIBLIOGRAFÍA

Atkinson, R. Atmospheric Chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*. 2000, 34, 2063-2101.

Báez A. P., Belmont R.D., Garcia R.M., Torres B. M.C., Padilla G. H. Rainwater chemical composition at two sites in central Mexico. *Atmospheric Research*, 2006; 80: 67-85.

Castellanos M. A., Salazar S., Gómez B. Influencia de la composición del suelo en el aerosol atmosférico de cuatro zonas de México. *Atmósfera* (1991), 4, pp165-176.

Charlson, R.J., Schwartz, S.E. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*. 255, 234-430.

Chen S.J, Lia S.H, Jian W. L, Lin C.C. Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air. *Environment Inter*.1997, 23, 475-488.

Cheng M.T, Tsai Y.I. Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas. *Science Total Environment*. 2000, 263: 101-114.

Chow J.C, Watson J .G, Edgerton S.A. Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997. *Science Total Environment* . 2002, 287: 177-201.

Dejo.R.A., Bhappu, R.B., Evans, G.C. *The environment and its resources* (1972). Gordon and Breach, Science Publishers. USA . Pág.257-280.

Derek Elsom. *La contaminación atmosférica*. Ediciones cátedra, S.A. Madrid, 1990.

Finlayson-Pitts J.B. y Pitts, J.N. *Chemistry of the Upper and lower atmosphere. Theory, experiments and applications*. Academic Press, San Diego, 2000.

Gordillo H. David. *Ecología y contaminación ambiental*. 1998.

Hand J.L, Kreidenweis S.M, Sherman D. ,Collett J.L. Aerosol size distributions and visibility estimates during the big bend regional aerosol and visibility observation(BRAVO) study . *Atmospheric Environment*, 2002; 36: 5043-5055.

Harold M. McNair, Benjamín Esquivel H. *Cromatografía Líquida de Alta Presión*. Editora: Eva V. Chesneau.1980, segunda edición Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C.

Hitzenberger R, Tohno S. Comparison of black carbon (bc) aerosols in two urban areas concentrations and size distributions. *Atmospheric Environment*, 2001; 35: 2153-2167.

Jacobson, Z.M. *Atmospheric pollution. History, science and regulation*. Cambridge university, 2002.

Jáuregui, E. El clima de la Ciudad de México. Temas selectos de geografía de México. Textos monográficos. Plaza y Valdés Editores, 2000.

John W, Wall S. Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol. *Atmospheric Environment*, 1990; 244: 2349 – 2359.

Lacy Rodolfo. La calidad del aire en el valle de México. El colegio de México. México, 1993.

Marple V.A, Rubow K.L, Behm S.M. A microorifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI): Description, calibration and use. *Aerosol Science and Technology* 1991; 14: 434-446.

Pueschel, R.F. Atmospheric aerosol in composition, chemistry and climate of the atmosphere, chapter 5, Ed. Han want B. Singh; New York, 1995.

Rico, M.G.; López, C. R. Daños a la salud por contaminación atmosférica, México, 2001.

Seinfeld J.H, Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change. Ed. Willey, New York, 1998.

Singh H.B. Composition, Chemistry and Climate of the Atmosphere. Van Nostrand Reinhold, 1995.

Spedding J. D. Contaminación atmosférica. Edit. Reverté, S.A. España, 1981.

Wayne R. P. Chemistry of atmospheres, 2<sup>nd</sup> edition Clarendon press Oxford; New York, 1995.

Zhuang H, Chan C.K, Fang M. Size distributions of particulate sulfate, nitrate and ammonium of a coastal site in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 1999; 33: 843 – 853.

Zhuang H, Chan C.K. Size distribution of inorganic aerosols of a coastal site. *Journal Aerosol Science*, 1997; 28: 213 – 214.