

ANÁLISIS DE DATOS DE PM2.5 REGISTRADOS CON EQUIPO TEOM EN LAS ESTACIONES AZCAPOTZALCO (AZC) Y SANTA URSULA (SUR) DE LA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (RAMA)

Biol. Roberto Muñoz Cruz, Ing. María del Rocío Carmona Mártir,
Ing. José Luis Pedroza Serrano, Téc. María Guadalupe Granados Gutiérrez

Secretaría del Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Jalapa No. 15 2do. piso, Col. Roma Norte, 06700, México, D. F.,
Tel. 55-11-84-62, Fax 52-07-92-96, e-mail dgpc@prodigy.net.mx

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca al análisis de las PM2.5 en la Zona Metropolitana del Valle de México por el daño que causan a la población, sin embargo este contaminante no tiene norma de protección a la salud, por lo que futuros estudios serán de gran importancia para su regulación.

Los datos fueron obtenidos con equipo TEOM en las estaciones de Azcapotzalco y Santa Ursula de la RAMA, del 7 de diciembre de 1998 al 20 de mayo de 1999 y del 2 de febrero al 20 de mayo de 1999, respectivamente.

Al comparar los resultados de ambas estaciones se observó, que Santa Ursula registró los niveles máximos de PM2.5 en el periodo de análisis, obteniendo estos en mayo; sin embargo en Azcapotzalco se presentaron las concentraciones más altas en diciembre y decrecieron a lo largo del periodo. Los coeficientes de correlación más altos fueron con los NOx y el NO₂.

INTRODUCCIÓN

Las PM10 se definen como partículas con diámetro de masa aerodinámica media menor a 10 micrómetros (μm). Para poder imaginar el tamaño de una partícula PM10 basta con señalar que el diámetro promedio de un cabello es de $50\mu\text{m}$. Las PM10 se subdividen en dos tipos fino y grueso; el tipo fino define partículas con diámetro menor a $2.5\mu\text{m}$ (PM2.5), el tipo grueso se refiere a las partículas con diámetro entre 2.5 y $10\mu\text{m}^1$.

Las partículas gruesas tienen una composición de origen terrestre, mientras que la composición química de las partículas finas muestra una abundancia mayor de derivados de azufre y nitrógeno, así como un 20% de material orgánico. Dichas

partículas se forman a partir de la interacción química o física entre los contaminantes presentes en el aire².

Los últimos años han sido motivo de estudio por el daño que representan para la salud humana. Las partículas de mayor importancia son aquellas que se pueden inhalar y depositar en regiones sensitivas del tracto respiratorio, afectando los mecanismos de defensa y el tejido pulmonar. Los ancianos, niños, individuos con padecimientos asmáticos y adultos con enfermedades pulmonares o del corazón, son los grupos con mayor riesgo a la exposición por partículas finas.

Entre más pequeño sea el diámetro de la partícula más profundo puede penetrar en el pulmón y mayor será el impacto sobre la salud. En efecto, desde el punto de vista de las funciones pulmonares, las partículas con diámetro mayor a 10 μm son menos peligrosas, debido a su peso caen al suelo rápidamente, si llegan a ser inhaladas se detienen en la nariz y garganta siendo fácilmente eliminadas a través de la tos, el estornudo o bien del sistema digestivo³.

Un estudio detallado de la composición química del material particulado ha demostrado que algunos de sus componentes pueden estar asociados con daños específicos a la salud, principalmente aquellos compuestos orgánicos provenientes de las emisiones de vehículos operados con diesel, en el cual encontramos metales pesados, metales con diferentes estados de oxidación, sílice y una gran variedad de especies químicas formadas durante los episodios de smog fotoquímico³.

Las partículas finas se originan por el consumo de combustibles de vehículos automotores, plantas generadoras de energía e industria, así como incendios forestales. También pueden formarse en la atmósfera por reacciones del bióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV's).

Entorno Urbano de la Estación Azcapotzalco (AZC). Zona Noroeste

La estación de monitoreo se ubica en el techo de un centro comunitario de salud, el cual está rodeado por un parque de juegos y terrenos baldíos que tienen una cubierta parcial de pasto. No existen edificios altos o árboles que obstaculicen la toma de medición.

La mayoría de las construcciones aledañas son de una o dos plantas, existen pequeños locales comerciales y la zona cuenta con todos los servicios, incluyendo la pavimentación de calles, las cuales se caracterizan por tener un flujo vehicular reducido.

Entorno Urbano de la Estación Santa Ursula (SUR). Zona Suroeste

Esta estación de monitoreo está instalada en el techo de un centro de salud. Las colonias aledañas a la estación se caracterizan por un uso de suelo habitacional, con construcciones de dos pisos principalmente, y cuentan con los servicios públicos indispensables. A unos 50 mts de la estación hay una hilera de árboles con alturas

entre 15 y 20 mts y aproximadamente a 100 mts de la estación se localiza una escuela primaria con un campo deportivo sin cubierta vegetal permanente.

Las calles cercanas a la estación están pavimentadas, el tránsito vehicular es bajo y predominan los autos particulares.

Monitoreo Continuo de Partículas

En la Ciudad de México se están realizando mediciones continuas de PM2.5 en las estaciones Azcapotzalco (AZC) y Santa Ursula (SUR) mediante equipo TEOM. Este equipo es muy sensible a cambios en concentraciones de masa y puede proporcionar mediciones precisas para muestras con duración de menos de una hora.

El monitor **TEOM SERIE 1400 a** tiene un mecanismo de tiempo real para la medición de la concentración de las partículas en el aire tanto en interior como exterior. Los equipos TEOM (Tapered Element Oscilating Microbalance) son monitores basados en filtros de masa que miden la masa de las partículas suspendidas de la corriente del gas en ese momento.

El monitor es ideal para adecuarse a las aplicaciones exigentes de monitoreo de tipo instantáneo. El cálculo de la concentración de masa, el total de la masa acumulada y la proporción de masa en el cartucho del filtro se realiza bajo las siguientes condiciones:

Flujo total de entrada mínimo de la toma de la muestra: 16.7l/min ($1\text{m}^3/\text{hr}$)

Flujo de la toma principal: 3l/min

Temperatura de la corriente de la muestra: 50°C

Límite máximo de detección de partículas aprox. $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ por un promedio de 5 min.

MÉTODO

Los datos de PM2.5 de las estaciones AZC y SUR fueron proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para los siguientes periodos:

- Estación Azcapotzalco / 07 de diciembre de 1998 al 20 de mayo de 1999
- Estación Santa Ursula / 02 de febrero al 20 mayo de 1999

Suficiencia de las bases de datos

Para validar la suficiencia de las bases de datos se consideró que cumplieran con un mínimo de 75% de datos horarios en cada base de datos mensual y como criterio de exclusión que fueran menores al mínimo de detección del equipo TEOM.

Análisis exploratorio

El análisis inicial consistió en una exploración mensual de datos horarios, para evaluar el comportamiento de las PM2.5 a lo largo del período de muestreo. Para ello se elaboraron diagramas de caja y bigotes, en los que se ilustraron los

estadísticos media, mediana, moda, percentil 25, percentil 75 y las concentraciones máxima y mínima.

También se elaboraron gráficos de máximos diarios en las dos estaciones de monitoreo para visualizar si existe un patrón de tendencia para este indicador.

Análisis estadístico

Además de los estadísticos mencionados, se obtuvieron otros estadísticos descriptivos, como la desviación estándar y la varianza para complementar la descripción de los datos.

Posteriormente se obtuvo el perfil horario para observar el comportamiento de las PM2.5 en un día típico, y evaluar la posible asociación con fuentes de emisión, así como su relación con otros contaminantes y variables meteorológicas. Inicialmente se obtuvieron perfiles para los días que registraron las concentraciones máximas en ambas estaciones, se evitaron los perfiles con datos menores al límite de detección y con variaciones extremas. La información de los contaminantes y variables meteorológicas faltantes, se tomaron de las estaciones Tlalnepantla (TLA), para el caso de AZC, y Pedregal (PED), en el caso de SUR.

Para cuantificar las relaciones observadas entre las PM2.5 en función de otras variables, se correlacionaron las concentraciones horarias de todo el periodo de muestreo de este contaminante con las de SO₂, NO₂, CO, O₃ y PM10, así como con las variables meteorológicas velocidad de viento, temperatura y humedad relativa.

Finalmente, para tener un marco de comparación se determinaron los niveles de PM2.5 con respecto a estándares internacionales, se calcularon los promedios móviles de 24 horas para los meses válidos en ambas estaciones y se obtuvo el número de días y de concentraciones horarias en que rebaso la norma trienal de los EUA de 65µg/m³.

RESULTADOS

Suficiencia de las Bases de Datos

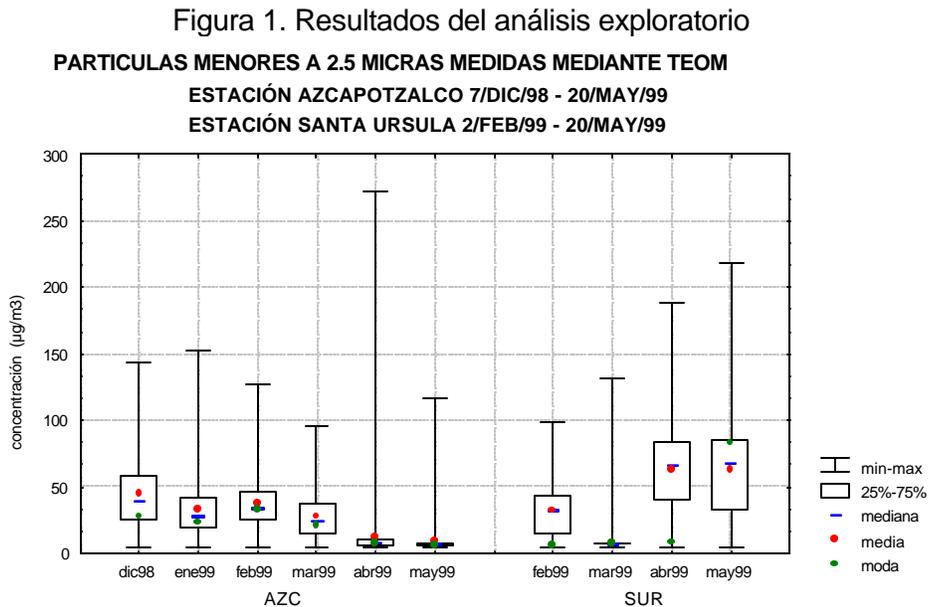
En los resultados de suficiencia de información en la estación de AZC, se puede señalar a priori que el desempeño del equipo de monitoreo fue decreciendo gradualmente, debido a que durante los primeros 4 meses tuvo más del 75% de datos horarios válidos, mientras que en abril y mayo el porcentaje fue mucho menor.

En el caso de la estación SUR, hasta el mes de mayo el desempeño del equipo de monitoreo fue satisfactorio, ya que en marzo y abril el porcentaje de datos válidos fue mucho menor al 50%. En febrero se registró solo 74% de valores por arriba del límite considerado, aunque se tuvo una frecuencia alta de concentraciones bajas.

Análisis Exploratorio

El análisis exploratorio de las PM2.5 por medio del diagrama de caja y bigotes (figura 1), permitió visualizar de mejor manera el comportamiento y suficiencia de los datos recabados en cada mes de monitoreo. En la estación AZC se puede observar irregularidad en los registros de abr99 y may99, cuando se registraron concentraciones por debajo de los $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en más del 75% de los casos.

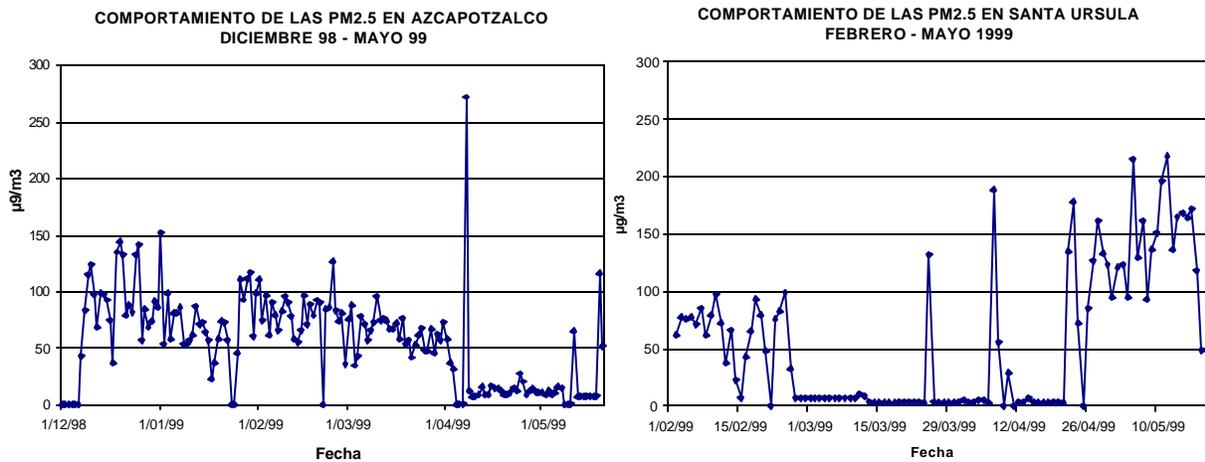
Por su parte, la distribución de los datos registrados de dic98 a mar99, sugiere un buen funcionamiento del equipo de monitoreo por el comportamiento que muestran los estadísticos de tendencia central (media, mediana, moda).



Para el mes de feb99 en la estación SUR los datos registrados corroboran el buen funcionamiento del equipo, por encontrarse los estadísticos dentro de la caja. El sesgo que muestra la moda en febrero se debió al registro de una frecuencia de datos bajos en los tres últimos días.

Al analizar las concentraciones máximas diarias de PM2.5 en la estación AZC, se observó un comportamiento decreciente a lo largo del período de muestreo, registrándose los niveles más altos en diciembre y los más bajos en marzo (figura 2).

Figura 2. Comportamiento de máximos diarios de PM2.5



En el caso de la estación SUR sus concentraciones máximas mostraron la irregularidad señalada en marzo y abril, al presentar valores bajos y concentraciones extremas.

Por lo anterior para el análisis estadístico de la información colectada en AZC se consideraron los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, y para SUR la obtenida en febrero y mayo.

Análisis Estadístico

Los resultados del análisis descriptivo para AZC en los meses seleccionados se presentan en la tabla 1. En ésta se observa que la media, la mediana y los percentiles tuvieron un decremento gradual de sus niveles, reflejando así la presencia de niveles altos en diciembre. En este mes también se tuvo una mayor variabilidad en los registros, lo cual se reflejó en los estadísticos de dispersión.

Tabla 1. Estadística descriptiva – Estación Azcapotzalco (AZC)

	dic-98	ene-99	feb-99	mar-99
Media	45	33	38	28
Mediana	39	28	34	24
Desviación estándar	27	21	19	17
Varianza	704	433	366	305
Mínimo	5	5	5	5
Máximo	144	152	127	96
Moda	28	23	33	21
Percentil75	58	42	47	37
Percentil25	26	19	25	14

En la estación SUR el análisis descriptivo de los datos de febrero y mayo mostraron un aumento significativo de un mes a otro. Esto se puede observar en los estadísticos de la media, la mediana y los percentiles, así como la concentración máxima (tabla 2). Como se mencionó anteriormente el valor de la moda en febrero se debió a una frecuencia elevada de datos bajos registrados en los tres últimos días del mes.

Con el incremento de los niveles de PM2.5 en mayo también se observó un aumento en la variabilidad de los mismos, lo cual se reflejó en la varianza y la desviación estándar.

Tabla 2. Estadística descriptiva – Estación Santa Ursula (SUR)

	feb-99	may-99
Media	32	63
Mediana	32	68
Desviación estándar	20	37
Varianza	419	1376
Mínimo	5	5
Máximo	99	218
Moda	6	83
Percentil75	44	85
Percentil25	15	32

En la tabla 3 se observa que las concentraciones máximas en la estación AZC se presentaron con mayor regularidad entre las 8:00 y las 13:00 horas, lo cual puede estar asociado con las actividades productivas de la población. Únicamente en diciembre se presentaron concentraciones máximas por la noche, debido probablemente a las festividades de este mes.

Tabla 3. Frecuencias relativas de concentraciones máximas de PM2.5

Hora	Azcapotzalco (AZC)				Santa Ursula (SUR)	
	dic-98	ene-99	mar-99	abr-99	febr-99	may-99
1 – 7	0.00	0.06	0.03	0.00	0.07	0.00
8 – 13	0.64	0.78	0.86	0.91	0.25	0.45
14 – 18	0.04	0.09	0.10	0.06	0.41	0.27
19 – 24	0.32	0.06	0.00	0.03	0.27	0.27

En la estación SUR las concentraciones máximas se presentaron a lo largo del día, en febrero la mayor frecuencia se presentó entre las 14:00 y 18:00 horas y en mayo entre las 8:00 y 13:00 horas (tabla 3).

Perfil horario de las PM2.5

El perfil horario del día 29 en la estación AZC se eligió por representar un día típico, ya que su patrón fue similar al de otros días y se caracterizó por no presentar valores inferiores al mínimo detectable.

En la figura 3 se observa que la concentración máxima de PM2.5 se registró a las 10:00 horas y que el período de aumento estuvo entre las 6:00 y 10:00 horas. También se observa que no tuvo una asociación directa con el perfil de las PM10 de la estación TLA, en tanto que con el perfil de CO de AZC tuvo un traslape.

En este mismo día se observa el traslape que presentó en su período de aumento con el periodo correspondiente a los NOx y el NO₂ medidos en la misma estación.

En el caso del O₃ sólo se observa un ligero traslape y el SO₂ no presentó una asociación.

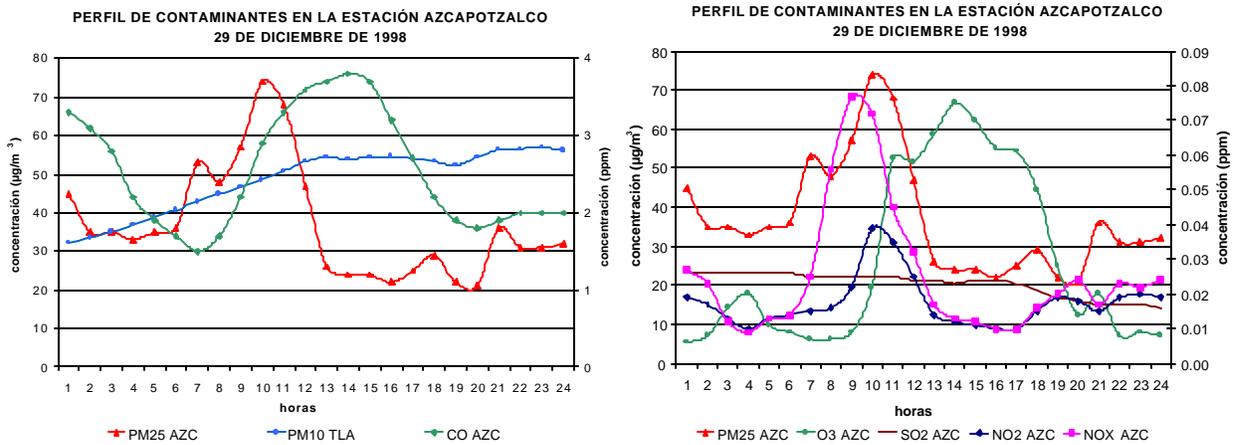


Figura 3. Perfil horario de las PM2.5 vs otros contaminantes

En relación con las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa y velocidad del viento medidas en la estación TLA, se observó una relación entre el descenso de las PM2.5 de AZC y el decremento de la humedad relativa, mientras que con la velocidad del viento y la temperatura la relación fue inversa (figura 4).

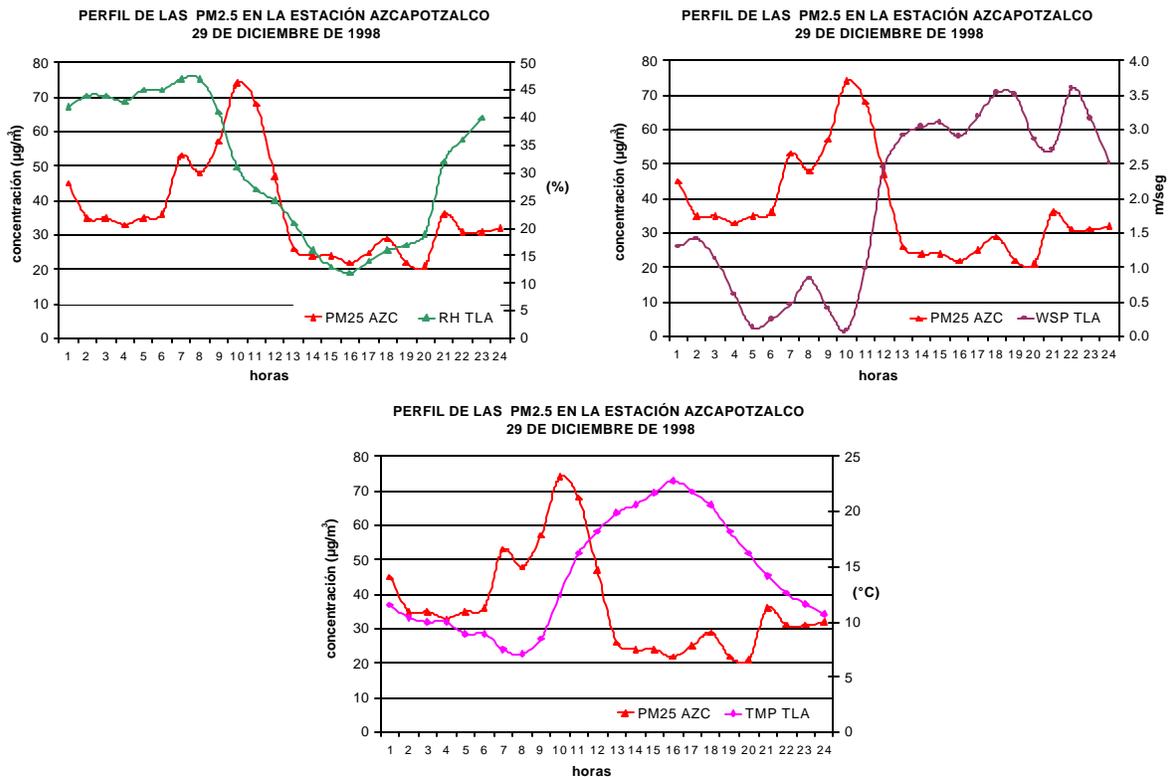


Figura 4. Perfil horario de las PM2.5 vs Variables meteorológicas

Los resultados de los coeficientes de correlación de datos horarios de las PM2.5 para la estación AZC (tabla 5), permiten evidenciar la relación señalada con los NOx y el NO₂, lo cual se observó en todos los meses. En el caso de las variables meteorológicas y los contaminantes CO, SO₂, O₃ y PM10, los resultados no permitieron establecer alguna asociación.

Tabla 5. Coeficiente de correlación de datos horarios de PM2.5
Estación Azcapotzalco

	dic-98	ene-99	feb-99	mar-99
PM10 TLA	0.272	0.200	0.200	0.1391
O ₃ AZC	0.034	0.087	0.247	0.2143
CO AZC	0.345	0.253	0.224	0.1193
NO ₂ AZC	0.501	0.449	0.539	0.4755
NOx AZC	0.508	0.427	0.522	0.4816
SO ₂ AZC	0.075	0.133	0.082	0.0232
TMP TLA	-0.063	-0.008	0.028	0.0311
RH TLA	0.042	0.083	0.032	-0.0365
WSP TLA	-0.258	-0.186	0.021	-0.2548

En el caso de la estación SUR, las concentraciones horarias de PM2.5 se correlacionaron con los datos de O₃, NOx, NO₂, CO y PM10 de la estación PED y los de SO₂ correspondieron a la estación SUR. Los resultados no permitieron establecer algún tipo de asociación entre estos contaminantes (tabla 6).

Tabla 6. Coeficiente de correlación de datos horarios de PM2.5
Estación Santa Ursula

	feb-99	may-99
PM10 PED	0.239	-0.056
O ₃ PED	0.035	0.076
CO PED	-0.022	0.072
NO ₂ PED	0.221	0.229
NOx PED	0.128	0.189
SO ₂ SUR	-0.128	-0.027
TMP PED	0.071	0.024
RH PED	0.081	0.070
WSP PED	-0.047	-0.164

Comparación con la norma de PM2.5 de los Estados Unidos (EUA)

Al comparar los resultados de los promedios de 24 horas con el valor de la norma de los EUA de 65µg/m³, en diciembre en la estación AZC se rebasó este valor en 46 horas, correspondientes a los días 19, 20 y 25. En enero las excedencias horarias a este valor fueron 9, las cuales se presentaron el día primero (tabla 7). En febrero y marzo no se tuvieron excedencias a este valor.

Tabla 7. Días superiores a la norma de PM2.5 de Estados Unidos
Estación Azcapotzalco

	dic-98	ene-99	feb-99	mar-99
horas >= 65	46	9	0	0
Días	3	1	0	0
No. de datos	542	655	614	691

En el caso de la estación SUR en los 20 días del mes de mayo considerados en este análisis, el 56% de las concentraciones horarias, obtenidas como promedios móviles, estuvieron por arriba del valor de la norma de los EUA, las cuales correspondieron a 16 días (tabla 8), en febrero no se superó este valor.

Tabla 8. Días superiores a la norma de PM2.5 de Estados Unidos
Estación Santa Ursula

	feb-99	may-99
horas >= 65	0	266
Días	0	16
No. de datos	454	479

Conclusiones y Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en la estación Azcapotzalco, se consideraron como datos válidos de diciembre de 1998 a marzo de 1999, periodo en el que se tuvieron concentraciones regulares en los registros horarios de las PM2.5.

En este periodo las concentraciones disminuyeron paulatinamente registrando los valores más bajos en marzo, este fenómeno se reflejó en los resultados de los estadísticos de las concentraciones horarias, mostrando su concentración máxima de $152\mu\text{g}/\text{m}^3$, la media de $45\mu\text{g}/\text{m}^3$, la mediana de $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la moda de $33\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la distribución de frecuencias las concentraciones máximas se presentaron de 8:00 a 13:00 horas; ya que en este periodo se realizan gran número de actividades y la mayor parte de la población se desplaza, sin embargo en diciembre también se tuvieron niveles altos por la noche, lo cual se encuentra asociado a las festividades de este mes.

El perfil horario de un día típico de PM2.5 alcanzó su nivel máximo a las 10:00 horas y el período de aumento estuvo entre las 6:00 y 10:00 horas. Al correlacionar los registros horarios de las PM2.5 con otros contaminantes los NOx y el NO₂ tuvieron el valor más alto, por lo que podemos decir que estos contaminantes tienen mayor asociación con los niveles de este contaminante.

En cuanto a las variables meteorológicas medidas en la estación TLA, se presentó una relación directa entre el descenso de las PM2.5 de AZC y la humedad relativa, lo que puede ser ocasionado por los compuestos presentes en las PM2.5 y las reacciones que ocurren, debido a que pueden formar compuestos higroscópicos, es decir que absorben la humedad. La temperatura está relacionada con la humedad

relativa, ya que cuando aumenta disminuye la humedad. En cuanto a la velocidad del viento se tuvo una relación inversa, es decir el viento dispersa los contaminantes que se emiten en la zona, por ello se puede inferir que las emisiones de PM2.5 no provienen de erosión de suelos.

La estación Santa Ursula tuvo como datos válidos febrero y mayo, presentando un aumento considerable en sus concentraciones de un mes a otro. Los resultados de la estadística descriptiva muestran el sesgo que se tuvo en febrero a valores bajos, con una moda de $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $83\mu\text{g}/\text{m}^3$ para mayo. La concentración máxima que se tuvo en este periodo fue de $218\mu\text{g}/\text{m}^3$, la media de $63\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mediana $68\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones máximas se presentaron en todo el día, presentando el porcentaje más alto de 14:00 a 18:00 horas en febrero y de 8:00 a 13:00 horas en mayo.

Al comparar con la norma de PM2.5 de Estados Unidos de $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio móvil de 24 horas, en la estación Azcapotzalco en diciembre se rebasó este valor en 3 días y sólo uno en enero. En el caso de Santa Ursula, en mayo se tuvieron 13 días con concentraciones superiores al valor de la norma y el 56% de los datos horarios sobrepasaron este valor.

Los resultados del análisis nos permitieron conocer los niveles de PM2.5 en la Ciudad de México, sin embargo estos equipos no fueron colocados en las estaciones de monitoreo adecuadas, si consideramos que no existen niveles altos de otros contaminantes, aunque es importante seguir monitoreando en estos sitios para comparar con los resultados que ya se tienen. También se debe considerar medir este contaminante en estaciones como Xalostoc, Nezahualcoyotl y Pedregal, por presentar altos niveles de PM10 y O₃, respectivamente.

Estos resultados sirven de base para desarrollar una metodología en la instrumentación de una Red de Monitoreo para caracterizar PM2.5 en la Ciudad de México.

6. REFERENCIAS

- 1.- El impacto económico asociado a la exposición a partículas PM10 en la Zona Metropolitana del Valle de México, Renata Villoro, Marina Lacasaña, Guadalupe Aguilar, Fundación Mexicana para la Salud, Dirección de Ciencias Ambientales. Instituto Nacional de Salud Pública, 1999.
- 2.- Caracterización de las Circunstancias Clínicas y Epidemiológicas que Rodean las Muertes en días de Alta y Baja Concentración de Partículas (PM10 y PM2.5) y otros Contaminantes Atmosféricos en la Zona Suroeste del Área Metropolitana en la Ciudad de México, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Dra. Margarita Castillejos Salazar, octubre 1997.
- 3.- Air pollution, physical and chemical fundamentals, Seinfeld, Jonh H. McGraw Hill, 1975. 4:143-195.