

VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CONTAMINACION DURANTE EL PERIODO 2000-2003 EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG), JALISCO, MÉXICO.

Ramírez-Sánchez H.U., Meulenert-Peña A.R., García-Guadalupe M.E.; De la Torre Villaseñor O.; Espinosa-Martínez M. L.

*Instituto de Astronomía y Meteorología, Dpto. de Física – Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías Universidad de Guadalajara. Av. Vallarta 2602. Col. Arcos Vallarta, Guadalajara Jal. Méx.
Tels: 3616-4937, Fax 3615-9829. ramirez@astro.iam.udg.mx, ameulene@astro.iam.udg.mx*

RESUMEN

Los índices de contaminantes son un buen indicador de la calidad del aire y sirven para la prevención de programas de contingencia ambiental en las grandes urbes como la ciudad de México, Guadalajara, y Monterrey. Las metrópolis localizadas en valles (caso de la ZMG), presentan baja dispersión de contaminantes lo cual se traduce en un mayor riesgo a enfermedades respiratorias, principalmente en la época invernal donde las inversiones térmicas son más prolongadas. Los índices de calidad del aire son evaluados en función de la concentración de los contaminantes CO, NO_x, NO₂, SO₂, PM₁₀ y O₃ durante un área y tiempos determinados. El objetivo de este trabajo es evaluar la evolución de la contaminación durante el periodo 2000-2003 en la ZMG. Las concentraciones de contaminantes fueron adquiridos a través de la red automática de monitoreo atmosférico, la cual monitorea los contaminantes cada 10 min., en 8 estaciones situadas estratégicamente en la ZMG.

Los resultados anuales promedio durante el periodo 2000-2003 muestran que 125 (34%) de los 365 días monitoreados sobrepasan la normatividad mexicana de emisión de contaminantes. Abril, mayo y junio presentan grandes concentraciones de contaminantes secundarios como el ozono, resultado de la reacción de contaminantes primarios (NO_x y NO₂) con la radiación solar, mientras que los meses de diciembre, enero, febrero y marzo presenta grandes concentraciones de contaminantes primarios, resultado de la presencia de bajas temperaturas que prolongan los tiempos de duración de las inversiones térmicas, lo cual impide la dispersión de los contaminantes.

Los resultados demuestran que en la ZMG existe una gran variabilidad en la dispersión de contaminantes durante el trienio 2000-2003. Dicha variabilidad depende principalmente de la dinámica atmosférica propia de la zona.

ABSTRACT

The levels of polluting agents are a good indicator of the quality of the air and are used for the prevention of programs of environmental contingency in the great large cities like the city of Mexico, Guadalajara, and Monterrey. The metropolis located in valleys (case of the ZMG), present a low dispersion of polluting agents which represented factors of risk of respiratory diseases, mainly at the winter time where the thermal investments have a space of time and prolonged thickness but.

The indices of quality of the air are evaluated based on the concentration of the polluting agents certain CO, NO_x, NO₂, SO₂, PM₁₀ and O₃ during an area and times. The objective of this work is to evaluate the evolution of the contamination during 2000-2003 in the ZMG. The concentrations of polluting agents were acquired through the automatic network of atmospheric monitoring, which monitors the polluting agents every 10 min in 8 stations located strategically in the ZMG.

The annual results average during period 2000-2003 show that 125 (34%) of the 365 monitoring days exceed the Mexican standards for the emission of polluting agents. April, May and June present high concentrations of secondary polluting agents like the ozone that is been from the reaction of primary polluting agents (NO_x and NO₂) with the solar radiation, whereas the months of December, January, February and March it presents high concentrations of primary polluting agents, result of low temperatures that prolong the times of duration of the thermal investments, which does not allow the dispersion of these polluting agents.

The results demonstrate that in the ZMG a great variability in the dispersion of polluting agents exists during triennium 2000-2003. This variability depends mainly on the atmospheric dynamics of the zone.

INTRODUCCION

La contaminación del aire, a diferencia de otros problemas ambientales puede, en muchos casos, percibirse con facilidad, especialmente en los grandes conglomerados urbanos. Sin embargo, más allá de la percepción de que el aire se ve sucio, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, midiendo los niveles en los que se presentan espacial y temporalmente los contaminantes que se conocen efectos para la salud. Al comparar estas mediciones con las normas nacionales e internacionales se puede determinar si la calidad del aire es satisfactoria o no. Y en este último caso, establecer programas de control dependiendo de la severidad del problema.

Al igual que muchas metrópolis del mundo y de nuestro país, la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) ha experimentado un acelerado crecimiento demográfico, lo cual demanda para el suministro de grandes cantidades de insumos y energéticos. La ZMG se ha constituido como el principal polo de desarrollo industrial, comercial y social en el occidente del país. Sin embargo este crecimiento y liderazgo ha traído consigo mayores impactos al medio ambiente y en particular, en un aumento de la generación de contaminantes atmosféricos.

La contaminación atmosférica en la ZMG es un problema de origen multifactorial, destacándose la presencia de un parque vehicular de 1'200,000 con una edad promedio de 10 años y cuyo estado de mantenimiento es con frecuencia inadecuado. Además, hay un número importante de industrias, comercios y servicios que, como resultado de sus actividades, emiten contaminantes en mayor o menor grado. Asimismo, las características fisiográficas y meteorológicas propias de la región ocasionan que, con frecuencia, no existan condiciones favorables para la dispersión de los contaminantes, por lo que deben necesariamente realizarse esfuerzos que garanticen una disminución en la emisión de los mismos.

De acuerdo con los datos más recientes (1999) en México, después de la Ciudad de México, la que presenta los mayores problemas de contaminación es Guadalajara, en donde se viola por lo menos una de las normas de calidad del aire en el 40 por ciento de los días del año. Al igual que en la ZMVM, la mayoría de las violaciones se deben al ozono (16 %) y a las partículas PM₁₀ (31%) y cuatro por ciento al bióxido de nitrógeno. Vale destacar que en 1995 el ozono alcanzaba concentraciones por arriba de norma en alrededor del 60 por ciento de los días del año.

El análisis de tendencias de la calidad del aire en la ZMG a lo largo de los años, permite inferir si existe un problema de deterioro creciente o una mejoría paulatina para cada uno de los contaminantes de interés. Estas tendencias constituyen, sin duda, el mejor indicador disponible para evaluar si la ciudad se dirige o se aleja de lo que puede considerarse como sustentable en materia de calidad del aire.

En base a lo anteriormente expuesto consideramos que es de vital importancia analizar la evolución de la calidad del aire en la ZMG para poder determinar su comportamiento espacial y temporal y determinar si este es ascendente o descendente.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es evaluar la evolución de la contaminación durante el periodo 2000-2003 en la ZMG.

Los objetivos particulares es establecer la tendencia del comportamiento de los contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), y partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀). Asimismo se pretende establecer correlaciones entre el comportamiento de dichos contaminantes.

ANTECEDENTES

Las normas de calidad del aire en México

En México, se ha establecido normas o estándares para los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (pst), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀) y plomo (Pb).

Las normas de calidad del aire establecen que las concentraciones máximas de contaminantes (Tabla 1a) no deberán sobrepasarse más de una vez por año para garantizarse que se protege la salud de la población en particular la de los grupos más susceptibles (niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas).

Los niveles o concentraciones de los contaminantes en el aire se expresan en unidades como: partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) o microgramos por metro cúbico (µg/m³). Dado que estos términos son poco familiares para la mayoría de la población, en México y en otros países se han desarrollado índices de contaminación que se comprenden más fácilmente. En México se usa el *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire* o IMECA (Tabla 1b), según el cual la concentración máxima permisible que señala la Norma de Calidad del Aire para cada contaminante le corresponde a 100 puntos IMECA. Por tanto, la gente sabe que cuando el ozono, las partículas o algún otro contaminante sobrepasa los 100 puntos, es que se ha rebasado la norma correspondiente, y la calidad del aire se considera como no satisfactoria. Entre 150-200 puntos IMECA la calidad del aire es mala y por arriba de los 200 puntos es muy mala.

México, ha adoptado límites similares a los aplicados en Estados Unidos o a los sugeridos por la Organización Mundial de la Salud. Recientemente, en algunos países se han establecido estándares para la medición de partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}), puesto que penetran con mayor facilidad en el tracto respiratorio. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental, EPA, de Estados Unidos, adoptó como estándares los valores de 65 µg/m³ para el promedio de 24 horas y 15 µg/m³ para el anual. En México, es probable que pronto emita una norma federal para PM_{2.5}.

Otro contaminante que requiere una revisión especial en nuestro país es el monóxido de carbono. Debiéndose adoptar como estándar el valor de nueve ppm que se aplica a nivel internacional (para el promedio móvil de ocho horas), en vez de nuestro más laxo estándar de 11 ppm.

Valores normados para los contaminantes

CONTAMINANTE	VALORES LÍMITE		
	Exposición aguda		Exposición crónica
	Concentración / tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Para proteger la salud de la población susceptible
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez en 3 años	—
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm *
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	—
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas)	1 vez al año	—
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m ³ *
Partículas, fracción respirable (PM ₁₀)	150 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m ³ *

Índice de calidad del aire

El Índice Metropolitano de Calidad del Aire o IMECA sirve para informar a la población acerca de los niveles de contaminación atmosférica.

Correspondencia entre concentración de contaminantes y valores IMECA

IMECA	CALIDAD DEL AIRE	PST (24 hr) µg/m ³	PM ₁₀ (24 hr) µg/m ³	SO ₂ (24 hr) µg/m ³	NO ₂ (24 hr) ppm	CO (8 hr) ppm	O ₃ (1 hr) ppm
0 -100	Satisfactoria	260	150	0.13	0.21	11	0.11
100-200	No satisfactoria	546	350	0.35	0.66	22	0.23
200-300	Mala	627	420	0.56	1.10	31	0.35
300-500	Muy mala	1,000	600	1.00	2.00	50	0.60

Tabla 1 a) Normas de calidad del aire en México y b) Índice metropolitano de la calidad del aire (IMECAS) adoptado en México.

La calidad del aire de una cuenca atmosférica depende, en primera instancia, del volumen de contaminantes emitidos, del comportamiento fisicoquímico de éstos y de la dinámica meteorológica que determina su dispersión, transformación y remoción en la atmósfera. La magnitud de las emisiones contaminantes depende a su vez de diversas variables intrínsecas a los múltiples e intensos procesos urbanos que se desarrollan en la ciudad, en un complejo sistema de interacciones.

AREA DE ESTUDIO: ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

1. Condiciones geográficas

La Zona Metropolitana de Guadalajara (Fig. 1) esta situada en el centro-occidente de México y representa la segunda urbe más importante de México. Es la capital del estado de Jalisco y se localiza a una latitud de $20^{\circ}39'54''N$, longitud de $103^{\circ}18'42'' W$ y una altitud de 1,540 metros sobre el nivel del mar, con una representa una superficie aproximada de 2239 km^2 , y una población de ≈ 5 Millones de habitantes. Fisiográficamente se sitúa sobre el denominado Valle de Atemajac, entre la cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá, entre las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. Las montañas que circundan la zona son: al noroeste la Sierra de San Esteban; al sureste, la Serranía de San Nicolás y los conjuntos montañosos Cerro Escondido-San Martín y El Tapatío-La Reyna; al sur, el Cerro del Cuatro-Gachupín-Santa María; y al oeste, la Sierra de la Primavera. Estas sierras constituyen una barrera física natural para la circulación del viento, que impide el desalojo del aire contaminado de la ZMG.

Esta región tiene un clima templado, subhúmedo con lluvias en verano. Los días promedio anual con lluvia oscilan entre 78 y 85. La precipitación acumulada varía entre 700 a 900 mm., por temporal (de Mayo a Octubre), el resto del año es considerado temporada seca (precipitación menor a 70 mm.).



Fig.1. Localización geográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)

2. Condiciones meteorológicas

La ZMG se encuentra afectada la mayor parte del año por la afluencia de aire marítimo tropical. Sin embargo, en el transcurso del año una gran variedad de fenómenos meteorológicos de escala regional, en superficie y en la atmósfera superior, tienen influencia sobre sus condiciones meteorológicas. La ZMG está sujeta también a la influencia de sistemas anticiclónicos, generados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico. Estos sistemas ocasionan una gran estabilidad atmosférica, inhibiendo el mezclado vertical del aire. Asimismo, recibe una abundante radiación solar debido a su latitud de 20°N, lo que hace que su atmósfera sea altamente fotoreactiva.

Época de invierno

En esta época (conocida también como “seca”), el anticiclón del Pacífico, al bajar de latitud genera vientos occidentales que favorecen la entrada de aire marítimo tropical, con un ligero contenido de humedad, generando lluvias poco importantes. Sin embargo, de manera temporal, la presencia de la Corriente de Chorro en los niveles superiores de la atmósfera, llega a reflejar una intensificación de los vientos occidentales en superficie y un aumento en el aporte de humedad, generando algunas precipitaciones. Asimismo se presentan invasiones de masas de aire frío y seco que penetran por la región norte del país y avanzan llegando a extenderse hasta la ZMG, provocando descensos de temperatura, algunas heladas y estratificación de las capas atmosféricas, intensificando el fenómeno de la inversión térmica.

Época de verano

En esta época (conocida como “de lluvias”) la ZMG se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente del Océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe, provocando altas temperaturas y favoreciendo el movimiento vertical ascendente del aire, disminuyendo la presencia, intensidad y espesor de las inversiones térmicas. Por otra parte, la influencia del Golfo de México y Mar Caribe se traduce en un

aumento de humedad en la ZMG, debido al constante avance de ondas tropicales, provocando importantes cantidades de lluvia y vientos de componente oriental.

En el caso del Océano Pacífico, el transporte de humedad es favorecido por el desplazamiento de masas de aire hacia latitudes mayores de la zona intertropical de convergencia, la que al activarse ocasiona fuertes desprendimientos de humedad hacia el Pacífico central, generando un aumento de nublados e intensas precipitaciones.

Durante la misma época se desarrollan importantes sistemas tropicales sobre el Océano Pacífico oriental, como son las perturbaciones, depresiones, tormentas tropicales y huracanes. Dichos sistemas llegan a provocar, de acuerdo a su circulación ciclónica y cercanía a tierra, la entrada de bandas nubosas y altas cantidades de precipitación con una intensificación de los vientos, los cuales llegan a la ZMG ligeramente degradados.

Inversión térmica

La frecuencia de inversión térmica en la ZMG esta presente 283 días del año, es decir un 78%, siendo los periodos de enero-junio y noviembre-diciembre, cuando su presencia se da prácticamente en todos los días del mes. Durante los meses de julio-octubre, su frecuencia llega a ser menor al 50% de los días del mes. Asimismo, la inversión térmica alcanza sus valores más altos de intensidad en las épocas de invierno-primavera y la mayor parte del otoño. En diciembre, la intensidad de la inversión térmica ha llegado a presentar valores máximos de hasta 12°C. Durante la mayor parte del período de lluvias, de junio a septiembre, e inclusive octubre, la intensidad promedio mensual de las inversiones térmicas es menor a 1°C.

El espesor de la inversión térmica es típicamente de decenas a algunos cientos de metros, siendo mayor en la época de secas y relacionada con temperaturas de rupturas de cerca de 13°C para los meses más fríos del año (enero y febrero).

Rosa de vientos y patrones generales de circulación en superficie

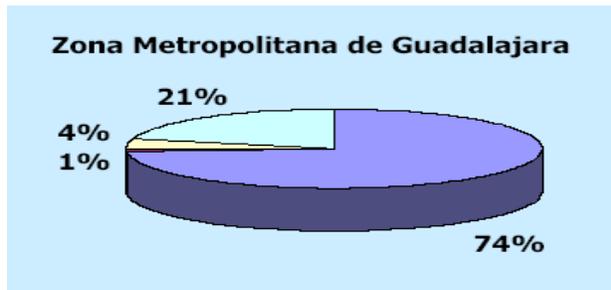
El viento dominante proviene del oeste con el 15.5% de la frecuencia total, seguido de los vientos del este con el 7.5%. En ambos casos, sus velocidades son entre 5-20 km/h y en forma temporal presentan velocidades de 21-35 km/h. Asimismo, se observan períodos de calma, que alcanzan una frecuencia del 44.3%, lo cual indica el gran potencial de acumulación de los contaminantes por falta de ventilación en la ZMG.

El viento manifiesta dos patrones principales de circulación; el primero con 33% de la frecuencia total, indica un flujo de vientos occidentales, incluyendo las direcciones suroeste, oeste-suroeste, oeste, oeste-noroeste y noroeste, para las épocas de invierno-primavera; el segundo en importancia, con 18% de incidencia, son los vientos orientales que incluyen las direcciones noreste, este-noreste, este, este-sureste y sureste para las épocas de verano-otoño. Los vientos provenientes del norte y sur, comparten sólo el 5% de la frecuencia total, con poca incidencia en la circulación local.

3. INVENTARIO DE EMISIONES

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico para el manejo de la cuenca atmosférica. El inventario realizado en 1996 presenta los siguientes resultados: el total de emisiones fue de 1'389,047 ton/año, de las cuales el 5% corresponden a la industria y servicios, y 74% al sector transporte. La contribución de las fuentes industriales es de 68% en SO₂ y 9% en NO_x; mientras que los vehículos

automotores emiten 91% de los NOx, 99% del CO, 57% de HC y 30% de SO₂. La contribución en partículas por la industria y los servicios es menor al 1% del total, sin embargo, se puede recalcar que su grado de toxicidad y la exposición de las personas asociadas a este sector es mucho más elevado que las partículas provenientes de fuentes naturales, las cuales representan 97% del total estimado. Cabe resaltar que la contribución de los servicios representa el 40% del total de los hidrocarburos. (Tabla 2).



■ Transporte ■ Industria ■ Servicios ■ Fuentes naturales

Fuente: INE/CENICA/JICA (1998) Segundo Informe sobre la calidad del aire en ciudades mexicanas-1997, México.

Según esta clasificación, la industria, el transporte y servicios aportan un total de 1'094,743 Ton/año, es decir, ~3,000 Ton/día; lo que equivale al 79% de la contaminación por fuentes antropicas (Fig.2).

Fig.2 Porcentaje de aportaciones naturales y antropicas de cada uno de los diferentes sectores productivos en la ZMG.

Tabla 2 Inventario de emisiones /ZMG-Toneladas por año y porcentaje del contaminante

FUENTE		Industria	Servicios	Transporte	Vegetación	Total
PST	Ton/año	1595	40	5845	294304	301784
	%	0.5	0.1	1.9	97.5	100
SO ₂	Ton/año	5506	118	2461	0	8085
	%	68.1	1.5	30.4	0	100
CO	Ton/año	1332	729	895991	0	898042
	%	0.2	0.1	99.7	0	100
NOX	Ton/año	3148	218	33820	0	37186
	%	8.5	0.5	91	0	100
HC	Ton/año	4269	57248	82318	0	143835
	%	3	39.8	57.2	0	100
Pb	Ton/año	0	0	115	0	115
	%	0	0	100	0	100
TOTAL	Ton/año	15840	58353	1020550	294304	1393174
	%	1.1	4.2	73.5	21.2	100

MATERIALES Y METODOS

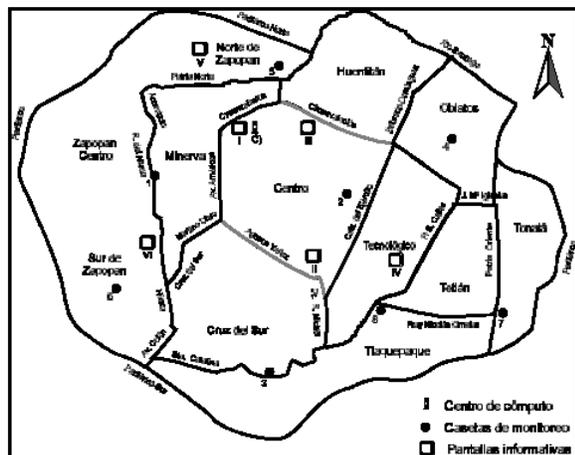
Las datos de las concentraciones de contaminantes del 200-2003 fueron adquiridos a través de la red automática de monitoreo atmosférico, la cual evalúa los contaminantes cada 10 min., en 8 estaciones situadas estratégicamente en la ZMG. En todas las estaciones de la red automática se encuentra instalado el equipo mostrado en la Tabla 4, se ubican como se indica en la Figura 3 y se muestra su composición esquemática en la Figura 4.

Tabla 4 Características de los equipos de la red automática de monitoreo atmosférico.

Características del equipo de monitoreo atmosférico

Parámetro	Tipo de analizador	Rango de medición
Ozono (O ₃)	Lear Siegler mod. 9810 Fotometría ultravioleta no dispersiva	Rango: 0.000 - 0.500 ppm Temperatura ambiente: 15 - 35 °C Voltaje: 105 - 125 volts, 60 Hz Régimen de flujo: 0.5 l/min
Oxidos de nitrógeno (NO _x , NO y NO ₂)	Lear Siegler mod. 9841 Detección quimioluminiscente de gases	Rango: 0.000 - 0.500 ppm Temperatura ambiente: 15 - 35 °C Voltaje: 105 - 125 volts, 60 Hz Régimen de flujo: 0.32 l/min.
Bióxido de azufre (SO ₂)	Lear Siegler mod. 9850 Espectrometría por fluorescencia de luz ultravioleta	Rango: 0.000 - 0.500 ppm Temperatura ambiente: 15 - 35 °C Voltaje: 105 - 125 volts, 60 Hz Régimen de flujo: 0.5 l/min
Monóxido de carbono (CO)	Lear Siegler mod. 9830 Fotometría infrarroja no dispersiva	Rango: 0 - 50 ppm Temperatura ambiente: 15 - 35 °C Voltaje: 105 - 125 volts, 60 Hz Régimen de flujo: 1.0 l/min.
Partículas menores a 10 micras (PM10)	Rupprecht & Pathashnick mod. TEOM SERIES 1400a Gravimetría	Rango: 0.005 - 1 g/m ³ Temperatura de la muestra: 50 °C Régimen de flujo principal: 0.5 l/min Régimen de flujo para la entrada de muestreo: 16.7 l/min.
Hidrocarburos (MHC y THC)	Horiba mod. Apha-350E Ionización de flama	Rango: 0 - 50 ppm Temperatura ambiente: 0 - 40 °C Tiempo de respuesta 1 min
Partículas suspendidas totales (PST)	Analizador de alto volumen marca GMW Gravimetría	Rango: autorango
Plomo (Pb)	Analizador de alto volumen Marca GMW Absorción atómica	Rango: autorango

Distribución del sistema de monitoreo atmosférico de la ZMG



Nota: Los equipos de la red manual se encuentran fuera de operación.

Fig. 3. Ubicación geográfica de las 8 estaciones de la red automática de monitoreo atmosférico de la ZMG.

Composición esquemática de una estación automática de monitoreo

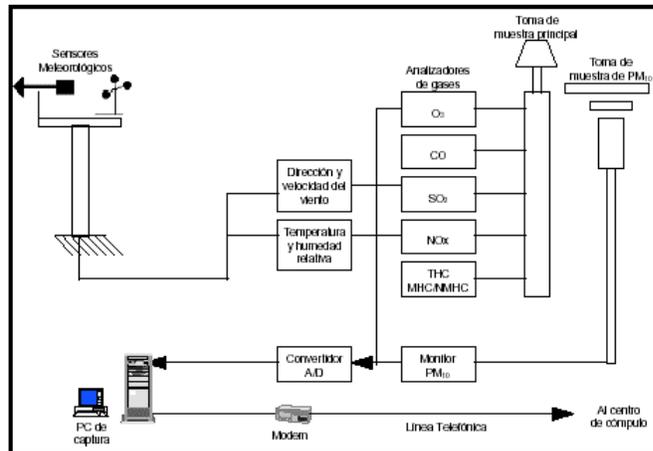


Fig. 4 Composición esquemática de las estaciones de la red automática de monitoreo atmosférico de la ZMG.

Una vez adquiridos los datos fueron analizados estadísticamente para obtener los comportamientos y tendencias en el periodo del 2000-2003.

RESULTADOS

Los resultados de las medias aritméticas, medianas, máximos y mínimos promedio anuales por estación, por año y durante todo el periodo 2000-2003 se presentan en la Tabla. Analizando la información obtuvimos los siguientes rasgos importantes:

1. Para el monóxido de carbono (CO) se presentan concentraciones cíclicas (Fig. 5a). Durante los primeros meses del año de enero-abril se presentan concentraciones altas, mientras que en la época de lluvias (julio-noviembre) dichas concentraciones tienden a disminuir. Un rasgo importante a resaltar es que a partir de noviembre del 2001 hasta diciembre del 2003 los promedios mensuales se han mantenido altos en comparación con los ciclos de baja concentración. Asimismo se puede apreciar picos de altas concentraciones en la estación Tlaquepaque en junio del 2000 y agosto del 2003. Las zonas que presentan las mayores concentraciones son Tlaquepaque, Loma Dorada y el centro de la ZMG:
2. El bióxido de azufre (NO₂) se comporta al igual que el CO de manera cíclica (Fig. 5b), durante los primeros meses del 2000 de febrero a junio se presentan valores altos, con descenso de concentraciones de julio a octubre, es a partir de noviembre que inicia el repunte de concentraciones promedio y se prolonga hasta febrero del 2001. Las concentraciones vuelven a descender durante toda el periodo seco y es a partir de septiembre del 2001 que se incrementan las concentraciones y se mantienen en niveles altos durante el 2002 y 2003. Por lo que muestra un comportamiento muy similar al registrado por el CO.
3. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) resultado de las emisiones directas y de las transformaciones de contaminantes primarios, presentan un comportamiento muy similar al registrado por los NO₂ (Fig. 5c). Al igual que para el CO y el NO₂ es a partir de los últimos meses del 2001 que las concentraciones inician su incremento y se mantienen altos hasta el final del 2003. La zona que presente los picos de máximas promedio es la zona centro durante los meses de diciembre y enero de cada año.
4. El ozono presenta un comportamiento inverso al de los contaminantes anteriores con valores altos durante los últimos meses de la estación seca de marzo a junio y descensos importantes durante la estación de lluvias y el invierno (Fig. 5d). Es importante resaltar el descenso importante de la estación de lluvias y de invierno del 2001 (julio-diciembre) que presenta concentraciones por debajo del promedio registrado en los periodos semejantes de los otros años analizados. Las concentraciones en todas las estaciones es homogéneo y los valores promedio máximo se presentaron en el estiaje del 2002 y del 2003. Asimismo se vuelve a confirmar la tendencia de los otros contaminantes de presentar valores más altos a finales del 2001 y hasta diciembre del 2003.
5. La partículas menores a 10 μm presenta un comportamiento cíclico muy homogéneo con valores altos durante la época de invierno (estación seca) y una disminución de concentraciones durante la época de verano (estación de lluvias) (Fig. 5e). En cuanto a las diferentes zonas estudiadas ellas presentan el mismo patrón de comportamiento aproximadamente con las concentraciones del mismo orden de magnitud. Destacándose ligeramente Miravalle y Loma Dorada.

6. Finalmente el bióxido de azufre (SO_2) presenta muy pocas variaciones en sus concentraciones promedio, por lo que se puede considerar como homogénea durante todo el periodo de estudio (Fig. 5f). Son las estaciones Las Águilas (agosto 2000), Miravalle (abril, julio, octubre y noviembre del 2002) y Vallarta (septiembre 2002) que presentan picos de máximos fuera del comportamiento considerado como homogéneo.
7. Finalmente podemos apreciar que los NO_x , NO_2 , PM_{10} y O_3 presentan aproximadamente el mismo patrón de comportamiento durante todo el periodo de estudio con variaciones cíclicas entre los periodos de invierno (estación seca) y verano (estación húmeda). Mientras que los CO y SO_2 presentan muy pocas variaciones en sus promedios anuales (Fig. 6).
8. El Comportamiento horario promedio de los contaminantes CO , NO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10} y SO_2 de la ZMG nos permite observar cuales son los horarios de predominancia de ciertos contaminantes. La Figura 7 a y b) muestran los perfiles de la concentración promedio horario de los diferentes contaminantes analizados. Podemos apreciar que las PM_{10} y los NO_x , se presentan como los contaminantes principales. La figura nos permite determinar el comportamiento bimodal de la mayoría de los contaminantes con horarios de exposición entre las 6-12 y 20-24 horas y un comportamiento unimodal para el O_3 entre las 9-21 horas. Asimismo podemos observar concentraciones más altas durante la época de invierno debido a la mayor frecuencia, tiempo de duración y espesor de las inversiones térmicas que impiden la dispersión de los contaminantes.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que en la ZMG existe una gran variabilidad en la dispersión de contaminantes durante el periodo 2000-2003. Dicha variabilidad depende principalmente de la dinámica atmosférica propia de la zona.

Los últimos meses de la época de invierno (estación seca) presentan grandes concentraciones de contaminantes secundarios como el ozono, resultado de la reacción de contaminantes primarios (NO_x y NO_2) con la radiación solar, mientras que los primeros meses de esa estación (diciembre, enero, febrero) presenta grandes concentraciones de contaminantes primarios, resultado de la presencia de bajas temperaturas que prolongan los tiempos de duración de las inversiones térmicas, lo cual impide la dispersión de los contaminantes.

Finalmente la época de verano (estación húmeda) presente un descenso en todos los contaminantes resultado de la acción de las precipitaciones que arrastra los contaminantes primarios, por lo que de alguna manera limpia la atmósfera, al mismo tiempo provoca un descenso de los contaminantes secundarios como el ozono debido a dos factores: por un lado a las bajas concentraciones de los contaminantes primarios precursores del ozono y por otro lado a la alta nubosidad que disminuye la insolación y la penetración de radiación UV.

El comportamiento horario de los contaminantes muestra una distribución bimodal de la mayoría de los contaminantes con horarios de exposición entre las 6-12 y 20-24 horas y un comportamiento unimodal para el O₃ entre las 9-21 horas.

Finalmente podemos apreciar un incremento en los valores promedio de los contaminantes a partir de los últimos meses del 2001, sosteniéndose estos valores durante el 2002 y 2003.

Tabla 5. Media aritmética, mediana, máximos y mínimos promedio anuales por estación, por año y durante el periodo 2000-2003.

MES	2000				2001				2002				2003				2000-2003			
	Media	Med.	Max.	Min.	Media	Med.	Max.	Min.	Media	Med.	Max.	Min.	Media	Med.	Max.	Min.	Media	Med.	Max.	Min.
AGUILAS	1.406	1.252	1.945	1.045	0.874	0.789	1.478	0.600	1.400	1.264	2.294	1.079	1.597	1.517	2.296	0.937	1.319	1.255	2.296	0.600
ATEMAJAC	1.993	1.874	2.808	1.616	1.455	1.436	2.332	0.900	2.142	2.024	3.088	1.513	2.136	1.979	3.658	1.612	1.931	1.884	3.658	0.900
CENTRO	2.488	2.446	3.926	1.896	1.833	1.535	3.526	1.200	2.246	1.964	3.539	1.779	2.643	2.417	4.259	1.965	2.303	2.233	4.259	1.200
LOMA DORADA	1.635	1.178	3.623	0.725	1.852	1.596	3.386	1.400	2.891	2.772	4.168	2.195	2.946	2.937	3.548	2.456	2.331	2.562	4.168	0.725
MIRAVALLE	2.009	1.922	2.791	1.517	1.463	1.363	2.526	0.800	2.363	2.223	3.595	1.762	2.092	2.263	2.874	1.017	1.982	2.004	3.595	0.800
OBLATOS	2.206	1.986	3.514	1.687	1.572	1.367	2.654	1.000	1.999	1.804	3.046	1.612	ND	ND	0.000	0.000	1.921	1.853	3.514	1.000
TALQUEPAQUE	2.451	2.003	4.868	0.929	1.679	1.848	2.503	0.800	2.258	2.081	3.789	1.654	2.448	2.194	5.275	1.582	2.209	2.112	5.275	0.800
VALLARTA	1.806	1.642	2.705	1.431	1.336	1.221	1.962	1.000	1.878	1.713	3.035	1.416	1.833	1.729	2.805	1.416	1.713	1.671	3.035	1.000
MEDIA ZMG	1.999	1.790	2.873	1.521	1.508	1.444	2.465	1.013	2.165	2.008	3.022	1.716	2.242	2.079	3.057	1.872	1.979	1.970	3.057	1.013
AGUILAS	0.033	0.031	0.045	0.022	0.038	0.038	0.054	0.016	0.057	0.058	0.089	0.026	0.058	0.057	0.076	0.046	0.047	0.046	0.089	0.016
ATEMAJAC	0.037	0.034	0.053	0.028	0.029	0.030	0.053	0.006	0.040	0.040	0.058	0.021	0.035	0.033	0.048	0.029	0.035	0.034	0.058	0.006
CENTRO	0.045	0.042	0.063	0.035	0.033	0.034	0.040	0.021	0.049	0.052	0.070	0.024	0.046	0.044	0.070	0.031	0.043	0.040	0.070	0.021
LOMA DORADA	0.042	0.043	0.059	0.016	0.032	0.033	0.054	0.005	0.042	0.041	0.050	0.036	0.042	0.042	0.050	0.031	0.039	0.042	0.059	0.005
MIRAVALLE	0.041	0.038	0.071	0.026	0.021	0.024	0.031	0.000	0.027	0.025	0.045	0.019	0.027	0.024	0.048	0.014	0.029	0.026	0.071	0.000
OBLATOS	0.032	0.030	0.053	0.022	0.024	0.023	0.037	0.000	0.024	0.021	0.036	0.015	ND	ND	0.000	0.000	0.027	0.024	0.053	0.000
TALQUEPAQUE	0.034	0.033	0.049	0.024	0.028	0.029	0.046	0.006	0.041	0.043	0.065	0.009	0.031	0.031	0.047	0.014	0.033	0.035	0.065	0.006
VALLARTA	0.030	0.027	0.042	0.017	0.020	0.021	0.029	0.009	0.029	0.028	0.037	0.020	0.032	0.028	0.057	0.018	0.028	0.026	0.057	0.009
MEDIA ZMG	0.037	0.036	0.048	0.030	0.028	0.029	0.035	0.018	0.040	0.040	0.047	0.030	0.039	0.037	0.051	0.030	0.036	0.036	0.051	0.018
AGUILAS	0.045	0.043	0.079	0.024	0.046	0.047	0.073	0.017	0.075	0.074	0.112	0.027	0.080	0.076	0.112	0.065	0.062	0.065	0.112	0.017
ATEMAJAC	0.059	0.053	0.099	0.038	0.039	0.034	0.079	0.007	0.071	0.060	0.121	0.037	0.063	0.052	0.130	0.038	0.058	0.052	0.130	0.007
CENTRO	0.074	0.060	0.146	0.042	0.042	0.038	0.083	0.022	0.103	0.092	0.232	0.032	0.091	0.066	0.232	0.040	0.077	0.057	0.232	0.022
LOMA DORADA	0.059	0.060	0.090	0.027	0.041	0.044	0.076	0.004	0.074	0.067	0.112	0.058	0.071	0.066	0.112	0.044	0.061	0.064	0.112	0.004
MIRAVALLE	0.057	0.057	0.089	0.030	0.023	0.024	0.058	0.000	0.041	0.041	0.065	0.020	0.041	0.036	0.093	0.016	0.041	0.036	0.093	0.000
OBLATOS	0.051	0.045	0.079	0.035	0.027	0.028	0.046	0.000	0.036	0.029	0.070	0.021	ND	ND	0.000	0.000	0.039	0.036	0.079	0.000
TALQUEPAQUE	0.062	0.049	0.150	0.031	0.040	0.040	0.098	0.006	0.078	0.066	0.138	0.012	0.063	0.049	0.148	0.029	0.060	0.051	0.150	0.006
VALLARTA	0.047	0.043	0.087	0.025	0.027	0.026	0.050	0.007	0.046	0.041	0.075	0.024	0.049	0.046	0.078	0.026	0.042	0.037	0.087	0.007
MEDIA ZMG	0.057	0.049	0.097	0.040	0.036	0.036	0.062	0.020	0.068	0.061	0.100	0.045	0.065	0.054	0.115	0.046	0.056	0.052	0.115	0.020
AGUILAS	0.019	0.016	0.033	0.010	0.018	0.013	0.036	0.008	0.026	0.025	0.038	0.013	0.027	0.025	0.048	0.013	0.023	0.023	0.048	0.008
ATEMAJAC	0.028	0.027	0.040	0.022	0.020	0.018	0.041	0.009	0.027	0.025	0.041	0.021	0.024	0.024	0.037	0.016	0.025	0.025	0.041	0.009
CENTRO	0.029	0.027	0.037	0.024	0.022	0.017	0.042	0.011	0.030	0.028	0.045	0.020	0.029	0.028	0.042	0.019	0.027	0.027	0.045	0.011
LOMA DORADA	0.023	0.023	0.035	0.013	0.011	0.007	0.029	0.001	0.025	0.023	0.044	0.018	0.024	0.020	0.052	0.017	0.021	0.020	0.052	0.001
MIRAVALLE	0.021	0.021	0.040	0.013	0.015	0.008	0.036	0.004	0.025	0.021	0.050	0.009	0.023	0.021	0.046	0.009	0.021	0.020	0.050	0.004
OBLATOS	0.024	0.025	0.033	0.016	0.016	0.020	0.035	0.001	0.028	0.025	0.043	0.020	ND	ND	0.000	0.000	0.022	0.024	0.043	0.001
TALQUEPAQUE	0.017	0.015	0.027	0.011	0.017	0.015	0.030	0.009	0.021	0.020	0.032	0.013	0.020	0.019	0.036	0.013	0.019	0.016	0.036	0.009
VALLARTA	0.023	0.022	0.027	0.017	0.017	0.011	0.042	0.003	0.027	0.024	0.045	0.018	0.025	0.023	0.042	0.017	0.023	0.022	0.045	0.003
MEDIA ZMG	0.023	0.021	0.032	0.018	0.017	0.013	0.035	0.007	0.026	0.023	0.042	0.019	0.025	0.022	0.043	0.016	0.023	0.022	0.043	0.007
AGUILAS	39.344	37.754	51.650	29.784	30.767	27.611	57.490	10.300	37.540	37.036	53.318	22.743	38.803	39.889	64.998	19.933	36.613	37.444	64.998	10.300
ATEMAJAC	44.659	44.836	63.963	27.182	34.947	35.389	56.709	11.800	36.250	35.588	50.155	23.960	29.781	32.387	46.530	15.401	36.409	36.138	63.963	11.800
CENTRO	50.672	50.240	76.878	32.138	39.141	40.187	61.076	15.600	50.212	45.917	110.141	29.356	44.549	45.186	79.075	19.958	46.143	45.186	110.141	15.600
LOMA DORADA	83.412	93.386	116.065	42.840	83.756	80.350	137.721	22.900	89.923	88.854	130.664	52.612	54.534	43.119	120.924	16.255	77.906	73.894	137.721	16.255
MIRAVALLE	100.978	105.459	145.768	64.668	72.935	64.650	110.747	31.000	82.896	87.364	120.412	53.234	83.392	93.658	155.958	24.583	85.050	91.636	155.958	24.583
OBLATOS	41.748	40.654	59.225	17.257	30.534	24.600	69.959	12.100	37.639	38.076	46.189	29.894	ND	ND	0.000	0.000	36.581	35.446	69.959	12.100
TALQUEPAQUE	71.299	71.280	105.332	45.543	55.294	55.534	82.785	24.200	65.177	69.147	91.994	21.532	66.243	65.675	114.200	32.448	64.489	67.379	114.200	21.532
VALLARTA	41.535	40.189	57.082	27.363	35.473	36.105	73.800	6.000	41.748	39.369	80.931	16.117	39.774	31.633	80.931	8.544	39.583	38.279	80.931	6.000
MEDIA ZMG	59.206	61.549	79.626	39.104	47.856	47.830	73.426	25.375	55.437	56.651	76.507	36.318	50.974	53.809	94.526	21.428	53.368	55.857	94.526	21.428
AGUILAS	0.012	0.005	0.065	0.003	0.005	0.004	0.010	0.002	0.011	0.011	0.013	0.010	0.012	0.011	0.014	0.009	0.010	0.010	0.065	0.002
ATEMAJAC	0.011	0.010	0.016	0.008	0.012	0.012	0.015	0.010	0.012	0.012	0.015	0.010	0.012	0.012	0.016	0.010	0.012	0.011	0.016	0.008
CENTRO	0.013	0.012	0.018	0.009	0.011	0.010	0.016	0.009	0.011	0.011	0.014	0.009	0.011	0.011	0.019	0.008	0.011	0.011	0.019	0.008
LOMA DORADA	0.007	0.004	0.014	0.002	0.005	0.004	0.011	0.002	0.005	0.004	0.008	0.003	0.006	0.006	0.010	0.005	0.006	0.005	0.014	0.002
MIRAVALLE	0.011	0.010	0.018	0.007	0.006	0.005	0.009	0.004	0.017	0.017										

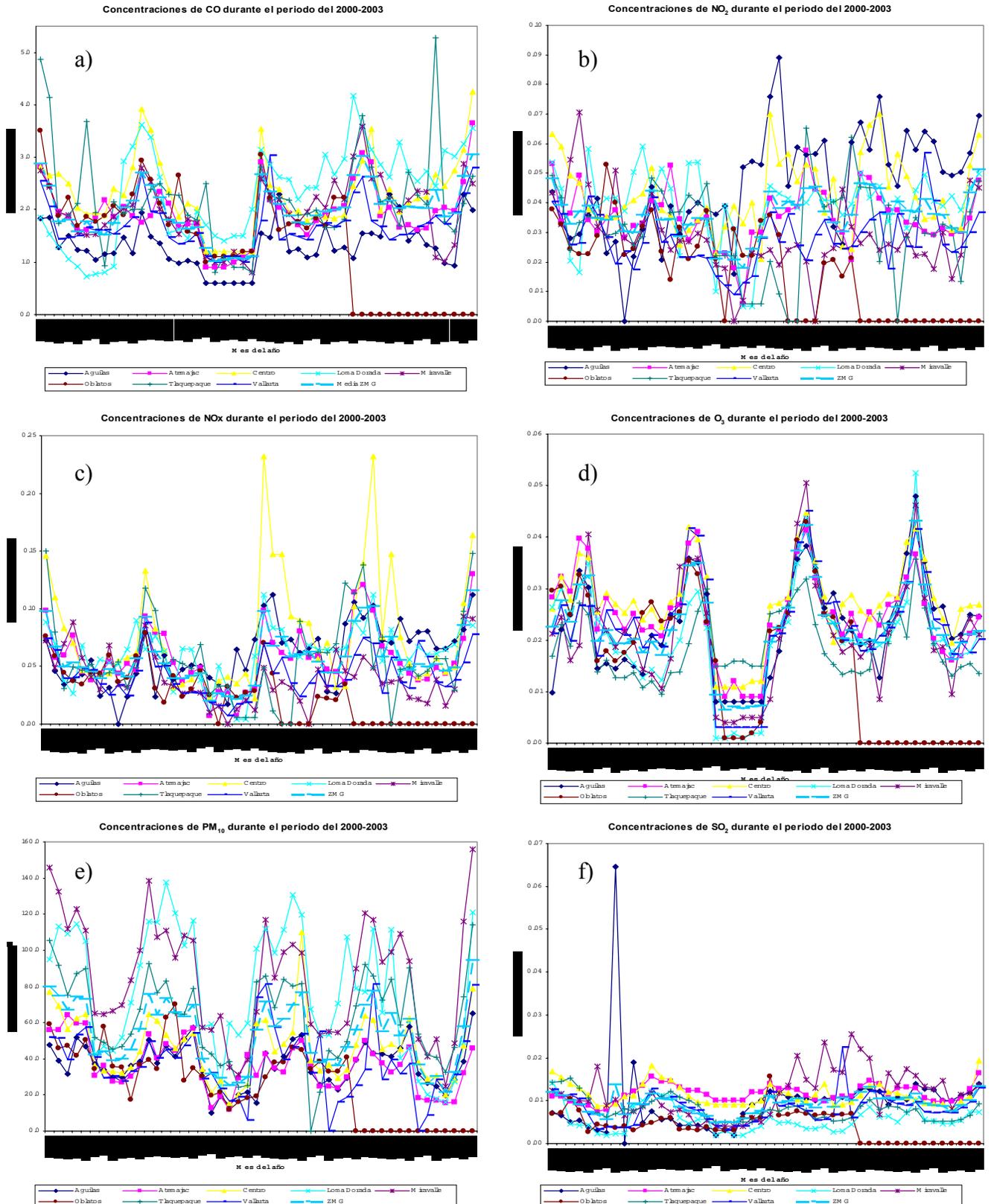


Fig.5 Descripción del comportamiento de los contaminantes a) CO, b) NO₂, c) NO_x, d) O₃, e) PM₁₀ y f) SO₂ durante el periodo de Enero del 2000 a diciembre del 2003.

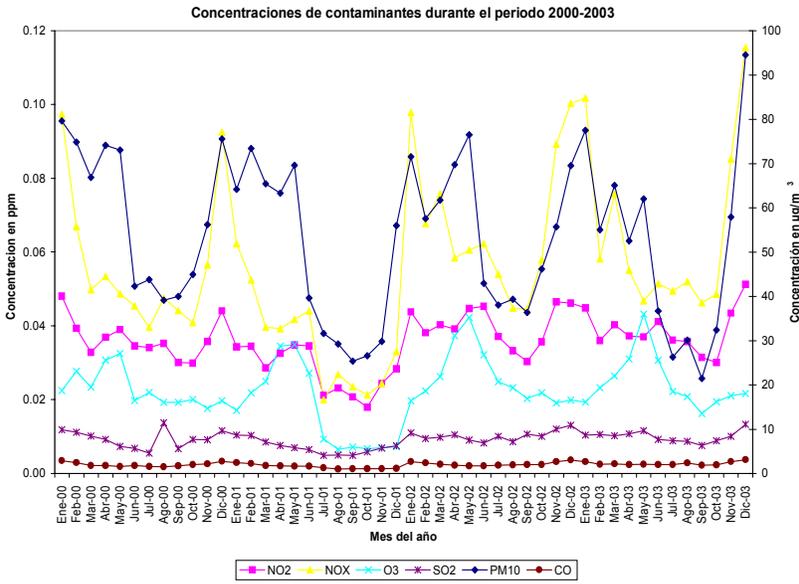


Fig.6 Descripción del comportamiento promedio de toda la ZMG de los contaminantes CO, NO₂, NO_x, O₃, PM₁₀ y SO₂ durante el periodo del 2000 al 2003.

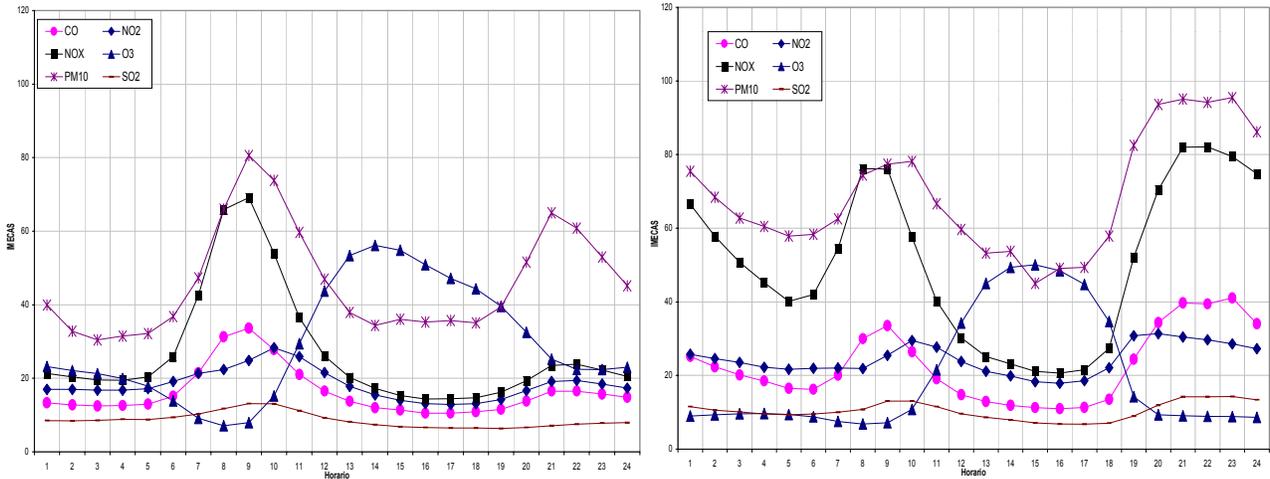


Fig.7 Comportamiento horario promedio de los contaminantes CO, NO₂, NO_x, O₃, PM₁₀ y SO₂ de la ZMG en a) Abril del 2003 y en b) Diciembre 2003.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

1. OSHA Technical Manual, Government Institutes Inc.
2. Buonicore, Anthony J.; Air Pollution Engineering Manual, Van Nostrand Reinhold.
3. Lodge/ James; Methods of Air Sampling and Analysis, Lewis.
4. Wight, Gregory D.; Fundamentals of Air Sampling, Lewis.
5. Maurizio Caselli; La contaminación Atmosférica. Siglo XXI editores. 1992.
6. Boubel R. W. Fox D.L., Turner. D.B. and Stern A.C. Fundamentals of Air Pollution. Third edition Academic press. 1994.
7. De Nevers Noel. Air Pollution Control Engineering. Second edition Mc. Graw Hill. 2000.
8. Gobierno del estado de Jalisco, Secretaria de Medio Ambiente, recurso naturales y Pesca, Secretaria de Salud; Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la zona metropolitana de Guadalajara 1997-2001. Marzo de 1997.
9. Wark K.; Warner C.F., Contaminación del aire Origen y control. Limusa Grupo Noriega Editores.1992.