

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE GUADALAJARA,  
JALISCO, MÉXICO.  
Parte I. MICROCLIMA Y MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN**

Valentina DAVYDOVA-BELITSKAYA<sup>1</sup>, Yuri N. SKIBA<sup>2</sup>, Sergei N. BULGAKOV<sup>1</sup>  
y Alejandro MARTÍNEZ Z.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara, Av. Vallarta 2602, S.J., Guadalajara 44130 Jal., México.

<sup>2</sup>Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México.

*(Recibido octubre de 1998, aceptado abril de 1999)*

Palabras clave: contaminantes atmosféricos, microclima, monitoreo ambiental

**RESUMEN**

La ciudad de Guadalajara, capital del estado de Jalisco es la segunda más grande en México. Un intenso crecimiento industrial y demográfico, sin una planeación integral han dado lugar a un desarrollo ambientalmente desequilibrado y, como consecuencia, a índices inadecuados de calidad del aire, que varía de manera no satisfactoria a mala casi 7 de cada 10 días al año. Para establecer un sistema de control sobre la atmósfera urbana se realizó un estudio integral del microclima, de la topografía y de la situación ecológica de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). Este análisis se hizo utilizando la base de datos de 8 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) en el periodo de 1994 a 1996, proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología de Jalisco (COESE). La serie de datos comprendió registros horarios de cinco contaminantes: ozono, monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno, bióxido de azufre y partículas suspendidas. Los resultados mas importantes obtenidos en este trabajo fueron: 1. Estimación de las características climatológicas de la zona de estudio y su variación en tiempo y espacio, 2. Valoración de la eficiencia de la Red Automática de Monitoreo Ambiental, 3. Determinación de los patrones de distribución anual y diurna de los cinco contaminantes monitoreados y 4. Localización de las zonas ecológicamente vulnerables en la ciudad.

**ABSTRACT**

Guadalajara, being the capital of the Jalisco State, Mexico, is the second largest city in the Mexican Republic. An intensive chaotic industrial and demographical growth resulted in an unbalanced development and low environmental protection. As a consequence, air quality index in this city vary from unsatisfactory to bad on almost 7 out of 10 days during the year. An integral study of the microclimate, topography and ecological situation of the Guadalajara Metropolitan Zone (ZMG) was carried out in order to develop a system of control over the urban air quality. This study is based upon data of three-years (1994-1996) obtained from the Automatic Environmental Network (8 stations) belonging to the Jalisco State Ecological Commission (COESE). The database contains hourly observations of five pollutants: ozone, carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and airborne particles. The more important results obtained in this work were 1. Evaluation of climatological characteristics and their temporal and spatial variations in the region under consideration, 2. Estimation of the efficiency of the Automatic Environmental Network, 3. Construction of daily and yearly distribution patterns of the five monitored pollutants and 4. Determination of the ecologically vulnerable regions of the city.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de la problemática ambiental en la República Mexicana muestra una marcada relación entre la contaminación y la orografía del medio, el tamaño y la dinámica de los asentamientos humanos y el crecimiento económico (Jáuregui 1997a). La presión ejercida por el crecimiento demográfico e industrial y la falta de planeación integral del uso del suelo y sus recursos han dado lugar a un desarrollo ambientalmente desequilibrado. Existen variables que contribuyen en los niveles de contaminación ya sea por permitir la dispersión o bien la acumulación de los agentes contaminantes en una área determinada, de ahí la importancia de tomar en consideración los factores climáticos, los geográficos y las características meteorológicas (Jáuregui 1988, Oke *et al.* 1992, Jáuregui y Romales 1996). Su evaluación se realizó con las técnicas descritas en la primera sección del presente trabajo y en la siguiente se dan los resultados de este estudio.

Otra variable que influyó en la contaminación atmosférica es la energética. México es un país con poca eficiencia en el uso de energéticos y requiere de mayores cantidades de energía primaria para producir la misma cantidad de bienes y servicios que en otras partes del mundo, en donde el desarrollo industrial es superior y los climas a menudo menos favorables. El consumo de gasolina en el sector del transporte representa el mayor gasto relativo de energía y la mayor aportación de contaminantes con respecto al volumen total (monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y plomo). Las mayores emisiones de bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas totales encuentran su contraparte proporcional en la industria y los servicios (González 1995).

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) no es ajena a esta problemática ambiental, su alta densidad demográfica y vehicular y su gran actividad industrial se han reflejado recientemente en los niveles de contaminación que actualmente prevalecen. El estudio de la situación ecológica de la ZMG arroja la información que se discute en la tercera sección del presente trabajo.

Finalmente, la investigación integral del microclima de la ZMG, la topografía del lugar y la situación ecológica llevan como objetivo final el desarrollo de un modelo numérico de transporte y de difusión de contaminantes con el fin de pronosticar los niveles de contaminación del aire en la ciudad y poder así controlar la calidad del aire urbano (Skiba 1993, 1997, Parra-Guevara y Skiba 2000).

## ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG)

### 1. Ambiente

#### a. Topografía

La ciudad de Guadalajara se ubica en una región geográfica cuyas coordenadas son latitud 20°41' N, longitud 103°20' W, altitud 1578 m sobre el nivel del mar. Su zona urbana, con un área de 340 km<sup>2</sup>, se sitúa principalmente sobre el valle de Atemajac (Fig. 1) y está rodeada al norte y noreste por una falla geológica conocida como barranca de Huentitan-Oblatos el

Alto, en el fondo de la cual corren los ríos Verde y Santiago. Al este se sitúa un macizo reolítico muy erosionado llamado Sierra de San Esteban. Al sur y al sureste el valle de Toluquilla (también considerado parte de la ZMG), del cual es separada por una pequeña cordillera basáltica y algunos volcanes basálticos, como los cerros La Cúpula, de la Reina o de Tonalá y de Cholo. Al suroeste se encuentran varios cerros de altura importante como el del Cuatro, de las Juntas, Santa María de Tequepexpan y del Tesoro. Al oeste se limita por la sierra de la Venta del Astillero (Díaz-Galindo 1946). Esta cadena de cerros rodea al valle en forma de U, determinando su cuenca atmosférica y el régimen de los vientos locales. Alrededor de la ciudad se localizan pocas áreas boscosas, de las cuales la realmente importante y considerada como pulmón de la ciudad, se llama bosque La Primavera, localizada en las afueras de la ciudad hacia el sur-suroeste. El bosque (parque) Los Colomos se localiza dentro de la urbe y forma la zona verde más importante dentro de la ciudad. Otro objeto geográfico importante que influye sobre el clima de Guadalajara es el lago de Chapala (con un área de 1112 km<sup>2</sup>), que es el más grande de la República Mexicana, y que se halla a escasos 40 km al sur-sureste de la ZMG.

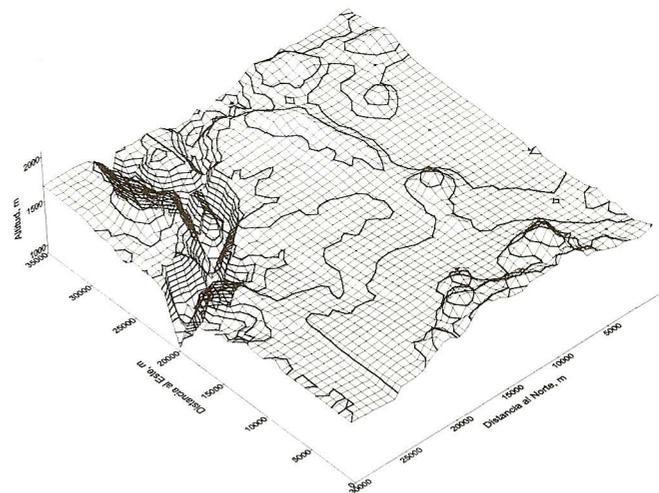


Fig. 1. Topografía de la zona metropolitana de Guadalajara

#### b. Climatología

La ciudad de Guadalajara se encuentra en una zona climática templada, subhúmeda con lluvias en verano según la clasificación del clima de Köppen (García 1988). El período de lluvias (precipitación de 700 a 900 mm) comprende de mayo a octubre y el resto del año es la temporada de secas (precipitación menor de 70 mm).

Las principales características climatológicas de la región (Tabla I) y su variación durante el período de observaciones se determinaron utilizando las series largas de temperaturas míni-

mas y máximas ( $t_{min}$  y  $t_{max}$ , °C) y de precipitación total anual ( $r$ , mm) por los períodos 1890 a 1996 y 1881 a 1996, respectivamente, y de humedad relativa ( $f$ , %), dirección ( $wd$ , grad) y velocidad del viento ( $ws$ , m/s) de 1960 a 1996 obtenidas de la

TABLA I. PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE GUADALAJARA, JALISCO, MÉXICO

Parámetro climatológico	Media	Desviación estándar
Temperatura max, °C	26.5	7.8
Temperatura min, °C	11.9	4.3
Temperatura med, °C	19.2	5.4
Humedad Relativa, %	62.4	14.8
Precipitación, mm Hg	892.2	153.5
Presión atmosférica, mb	845.5	6.7
Dirección del viento, grad	225.0	-
Velocidad del viento, m/s	3.4	2.1

estación climatológica del Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM) de la Universidad de Guadalajara.

El análisis de la variación permitió establecer una tendencia creciente en la temperatura mínima a partir de 1927 con un gradiente de 0.59 °C/10 años (Fig. 2). El período de 1890 a 1927 se caracterizó por una tendencia inversa, pero según la información histórica durante este período la estación climatológica fue reubicada en varias ocasiones sobre el territorio creciente de la ciudad de Guadalajara (Díaz-Galindo 1934),



Fig. 2. Distribución de la temperatura mínima y máxima anuales (1890-1996)

por lo tanto este lapso se considera poco confiable para los análisis e inferencias hasta conocer las fechas y lugares exac-

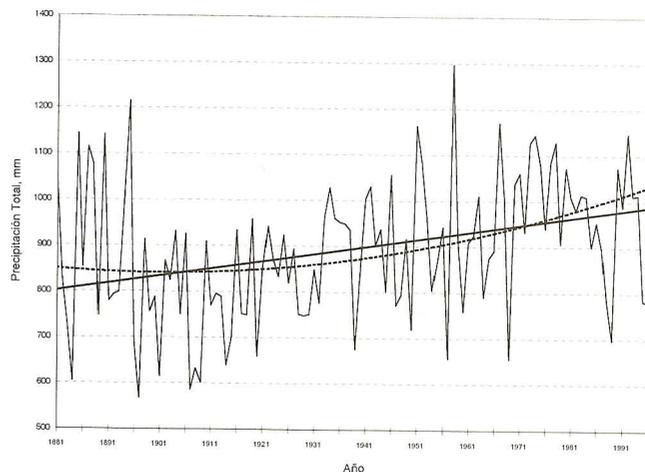


Fig. 3. Distribución de la precipitación total anual (1881-1996)

tos de los traslados de la estación.

La tendencia lineal de la serie de precipitación total anual fue también creciente con un gradiente de 1.75 mm/año (Fig. 3, curva -). Sin embargo, el ajuste exponencial del comportamiento histórico de la lluvia total anual estableció un período de distribución uniforme (1881-1931), después del cual se observó un rápido incremento del total anual con un gradiente de 2.77 mm/año (Fig. 3, curva —), de tal manera que el total anual de precipitación ha aumentado su valor de 866.9 mm (1881-1964) a 969.00 mm, para el período de 1961 a 1996 (Davydova y Skiba 1999).

Al comparar las estadísticas del viento dominante de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (Plan Lerma 1964) con las observaciones hechas en la estación climatológica del IAM, se aprecia una significativa degradación de la velocidad del viento dominante en la ZMG de 8.0 m/s (1881-1964) a 4.8 m/s (1960 -1996). Este decrecimiento está relacionado con el desarrollo de la ciudad: construcciones de edificios altos próximos a la estación climatológica y expansión de la zona urbana en general, originando el acrecentamiento del parámetro de rugosidad y fuerzas de fricción (Davenport 1963). Sin embargo, el patrón de la distribución anual de velocidad del viento dominante sigue siendo el mismo para ambos períodos pues presentó vientos más intensos durante marzo, abril y mayo, conocidos como vientos alisios (Tabla II). El análisis de la dirección del viento dominante mensual también mostró variaciones significativas. Si las estadísticas del Plan Lerma indicaron el predominio de flujos zonales con la dirección oeste ( $W$ ) durante el período seco y su cambio a la dirección este ( $E$ ) para el tiempo de lluvias, las

TABLA II. COMPORTAMIENTO DE LOS VIENTOS DOMINANTES MENSUALES (M/S) EN EL VALLE DE ATEMAJAC (PLAN LERMA 1964)

Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1881-1964	E-3.0	W-6.0	W-6.0	W-6.0	W-8.0	W-3.0	E-3.0	E-3.0	E-3.0	E-3.0	NW-3.0	W-3.0
1960-1996	WSW-2.0	WNW-2.5	NNE-4.0	W-4.8	E-3.7	E-3.5	ESE-3.3	ESE-3.3	SE-3.2	SE-3.4	ESE-3.2	SW-3.0

últimas tres décadas mostraron mayor variedad en la dirección (Tabla II), que tal vez, puede explicarse como resultado de fuertes turbulencias del flujo dominante producidas por altas y densas construcciones en la zona urbana e influencia de los vientos térmicos, producto de la “isla del calor” de Guadalajara.

Además del análisis climatológico estadístico fueron investigados los campos de temperatura y humedad relativa utilizando la información de las 8 estaciones de la RAMA (Davydova y Skiba 1999). Como resultados mas importantes en el estudio del campo de temperatura fueron obtenidas la ubicación y la intensidad de la “isla de calor” en la ZMG (Fig. 4). El máximo de ésta

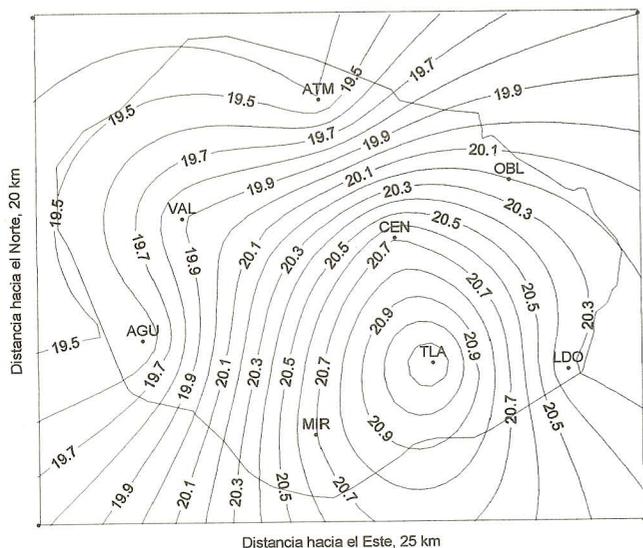


Fig. 4. Distribución espacial de temperatura media anual, T °C (1994-

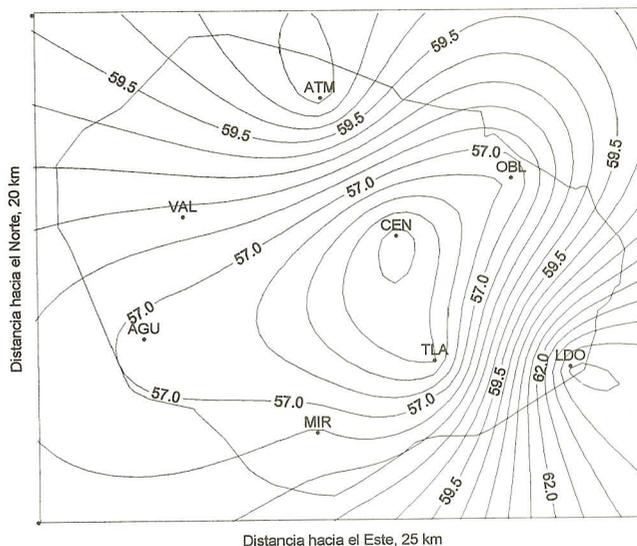


Fig. 5. Distribución espacial de humedad relativa media anual, F % (1994-

La ciudad de Guadalajara fue fundada en 1542 con 563 familias indígenas y españolas. En 1850, inicia la industrialización de la región, con una población de 25 000 habitantes aproximadamente. En 1890, la población llegó a 90 000 mil habitantes y en 1900 ya sumaba más de 120 mil. Para 1940 el total fue de 229 000 y veinte años después alrededor de 736 800, que fue el 30% de la población de Jalisco. En 1970, el total de la población rebasó un millón doscientos mil habitantes, aproximadamente 36 % de toda la población del estado. En 1975, se denomina Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) a la zona urbana de la capital, que había alcanzado e incorporado a las poblaciones de Tlaquepaque, Zapopan y unos años más tarde se integró el municipio de Tonalá. Por lo

se sitúa ligeramente al sur-sureste del centro de la ciudad. Con una intensidad máxima observada para marzo igual a 0.65 °C/km.

Otro resultado de importancia al estudiar los campos de humedad relativa fue la correspondencia a las particularidades de la distribución espacial de temperatura y topografía de la región, es decir los centros de mínima humedad relativa se encontraron justo sobre las zonas de máxima temperatura y/o regiones de mayor altitud del valle Atemajac en donde está situada la gran urbe (Fig. 5).

Los campos de velocidad del viento dominante mensuales y anual construidos sobre la información de las 8 estaciones de la RAMA para el período de 1994 a 1996 reflejaron el patrón del comportamiento de flujos locales condicionado por la circulación dominante de macro o mesoescala y el diseño urbanístico de la localidad (Fig. 6). Aquí las zonas uniformes del viento débil correspondieron a las colonias y los fraccionamientos de construcciones densas y edificios altos; a su vez, los corredores del viento máximo coincidieron con las particularidades topográficas de la región (regiones encerradas entre dos o más elevaciones sobre el valle Atemajac).

2. Desarrollo urbano

a. Población

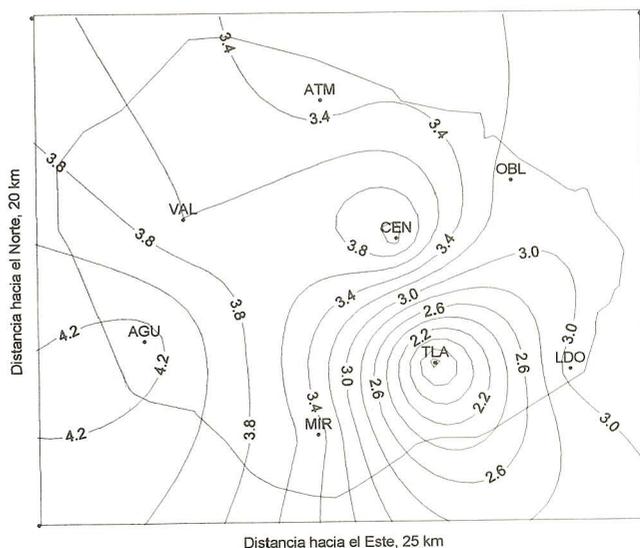


Fig. 6. Distribución de la velocidad del viento dominante anual, WS m/s, (1994-1996)

tanto, los datos de población total en la ZMG, según los censos de 1990 y 1995, arrojaron números de 2.9 y 3.6 millones de habitantes, respectivamente, establecidos sobre un área de 320 y 340 mil kilómetros cuadrados. El análisis de los datos anteriores indica que el crecimiento de la población tiene un carácter exponencial y se pronostica que para el año 2010 la cantidad de habitantes llegará a 4.6 millones aproximadamente (Fig. 7).

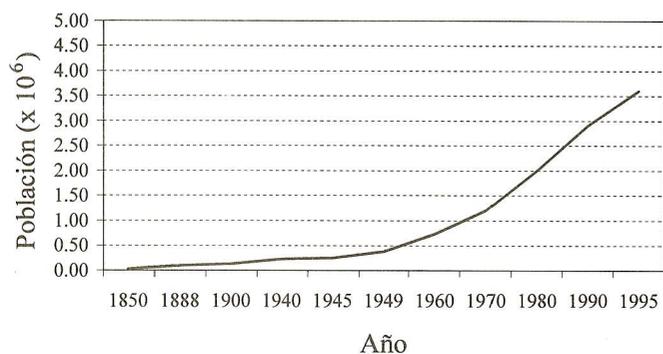


Fig. 7. Crecimiento de la población en la ciudad de Guadalajara (1850-1995)

### b. Transporte

En 1975, empezaron a registrarse índices crecientes de bióxido de azufre, debido a que los autobuses del transporte público comenzaron a utilizar motores de diesel, factor de emisión de 6.5 g por cada kilómetro recorrido (Alvarado Castellano y Reyes Nodhal 1986). En 1980, el parque vehicular de Guadalajara fue de más de 250 000 automóviles. El censo de 1990 arrojó los datos de un parque vehicular de 407 354 automóviles, camiones y ómnibuses. En 1995, se detectaron 620 000 vehículos circulando en la ZMG, contribuyendo con 75 % de la contaminación que fue emitida al aire y que equivalió a una emisión total de 730 000 toneladas de contaminantes (González 1995).

### c. Industria

En 1850 (unos trescientos años después de su fundación), Guadalajara empezó su desarrollo industrial con la instalación de fábricas textiles e industrias tabacalera y tequilera. En 1888, la ciudad contó con 295 establecimientos. En 1960-1970 se fundó una zona industrial amplia en el sur de la región, que continúa creciendo de tal manera que a principio de los años ochenta la ZMG contó ya con trece zonas industriales (González 1995): Zona Industrial de Guadalajara, Corredor Industrial González Gallo-Dr. R. Michel, Parque Industrial Belenes Norte, Ciudad Granja, Alamo Industrial, Anillo Periférico Sur, Barrio El Retiro, Colonia Seattle, Corredor Nogales-Periférico, El Colli, Las Fuentes, Av. Vallarta-Av. México, Colonia del Fresno. La cantidad de giros industriales contaminantes asentado en estas zonas fue de 6 000, estimado durante la elaboración del Plan Estatal de Ecología del Estado, 220 de ellos fueron tipificados como de alta contaminación, siendo los principales: fundiciones, cementeras, industrias químicas de productos ácidos y de plaguicidas, minerales no metálicos, fabricación de acumuladores y de grasas, aceites y derivados. Otros 1 200 fueron tipificados como nivel medio de contaminación, destacando los giros de embutidos, bebidas, industria textil, huleras, curtidurías, metálica básica y alimenticia. El resto de los giros se consideraron de bajo potencial de contaminación, siendo estos principalmente de la rama de la industria del calzado, impresiones, plásticos, química general y de limpieza (González 1995).

Ecología Estatal de Jalisco realizó una investigación para determinar la situación ecológica de la capital del estado. Los resultados mostraron que en la ZMG aproximadamente el 20 % de la contaminación del aire es debida a procesos industriales, lo que representa alrededor de 533 toneladas por día ó 125 544 toneladas por año (González 1995).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos de los contaminantes atmosféricos que se analizó fue obtenida de las ocho estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) proporcionada por

TABLA III. UBICACIÓN, NOMBRES Y PARÁMETROS DE MEDICIÓN\* DE LAS ESTACIONES DE LA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO AMBIENTAL (RAMA) EN LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA, JALISCO, MÉXICO

Nombre	Clave	Ubicación	Altitud (m.s.s.t.)
Aguilas	AGU	Av. L. Mateos #5250	25
Atemajac	ATM	Av. Hidalgo esq. con Niños Héroes	15
Centro	CEN	Calle Churrubusco # 143	9
Loma Dorada	LDO	Loma P. Norte esq. Loma P. Sur	7
Miravalle	MIR	Av. G. Curiel esq. J. Salomé Piña	25
Oblatos	OBL	Calle Avelino M. Presa # 1685	10
Tlaquepaque	TLA	Calle Constitución # 159	7.5
Vallarta	VAL	Plaza México, por la calle Coras entre Lacandonas y R. del Nardo	21

Nota: m.s.s.t significa metros sobre la superficie terrestre

\*en todas las estaciones: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>

la Comisión Estatal de Ecología de Jalisco, México. Cada estación realizó el monitoreo continuo de los parámetros indicados en la **Tabla III** con un período fijo de 10 minutos. Además estuvieron equipadas con los sensores de medición de temperatura ( $t$ , °C), humedad relativa ( $HR$ , %), velocidad ( $V$ , m/s) y dirección del viento ( $D$ , grad), lo que permitió estudiar la variación del clima local no sólo en el tiempo, sino también en el territorio creciente de la ZMG.

Por medio de técnicas estadísticas descriptivas fueron calculados los parámetros de temperatura y precipitación de la ZMG empleando más de 100 años de observaciones. Los parámetros climatológicos de humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento fueron calculados utilizando la serie de los últimos 36 años de mediciones, en donde toda la información fue obtenida de la estación climatológica del Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara.

Por medio de técnicas estadísticas descriptivas fueron calculados los promedios horarios para cada uno de los contaminantes tales como: ozono ( $O_3$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), bióxido de azufre ( $SO_2$ ), bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y partículas ( $PM_{10}$ ), con el fin de obtener su comportamiento diario y anual. Aquí las curvas de distribución diaria y anual de  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$  y  $PM_{10}$  presentaron los promedios de datos (horarios y mensuales respectivamente) que correspondieron al período de 1994 a 1996.

Para estimar la eficiencia de la red de monitoreo se aplicó la técnica de correlación espacial (Serón *et al.* 1992) y de la interpolación polinomial de Shepard (Kincaid y Cheney 1994) y se calcularon:

1. El coeficiente de correlación múltiple entre las estaciones de monitoreo en la ZMG

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{1i} - \bar{C}_1)(C_{2i} - \bar{C}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{1i} - \bar{C}_1)^2 \sum_{i=1}^n (C_{2i} - \bar{C}_2)^2}}, \quad (1)$$

donde

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{1i} \text{ y } \bar{C}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{2i} \quad (2)$$

Aquí  $C_{1i}$  y  $C_{2i}$  fueron  $i$ -ésimas mediciones de algún contaminante determinado en la estación 1 y 2, respectivamente, y  $\bar{C}_1$  y  $\bar{C}_2$  fueron las medias muestrales de las  $n$

mediciones en las estaciones 1 y 2, respectivamente.

2. La varianza explicada para cada serie de contaminantes en cada una de las estaciones, utilizando técnicas de análisis de varianza.
3. El coeficiente de correlación crítico (Ezekiel 1941):
 
$$\text{Varianza explicada} = r^2_{\text{crítico}} \quad (3)$$
4. Se comparó el coeficiente de correlación crítico con los calculados según la fórmula (1). Si el calculado fue mayor que el crítico, significa que las dos estaciones estuvieron en una zona homogénea y, tal vez, duplicaron las observaciones. Si el coeficiente de correlación fue igual ó próximo al coeficiente crítico entonces las estaciones estuvieron distribuidas en forma óptima y por lo tanto, es posible considerar a la red como eficiente. Si el coeficiente de correlación calculado fue menor y todavía mucho menor que el coeficiente de correlación crítico, hubo zonas de poco control ambiental entre las estaciones, lo que pudo introducir grandes errores en las estimaciones de calidad del aire y su pronóstico, sobre todo, cuando en este territorio sin monitoreo alguno, existieron algunas fuentes moderadas de emisiones
5. Se analizó la distribución de la red de monitoreo y su eficiencia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para resaltar la importancia de los estudios y del control sobre la calidad del aire se hizo el cálculo de frecuencias de días con diferentes niveles de contaminación según los Índices Mexicanos de Calidad del Aire en la ZMG durante 1994 a 1996, proporcionados por la COESE. Este estudio arrojó los siguientes datos: en 1994 se registraron 70 % de los días con la calidad de aire no satisfactoria a mala, en 1995 fueron 74 % y en 1996 el total fue 77 % de los días que no responden a los estándares de calidad del aire establecida por las normas mexicanas (**Tabla IV**). Para analizar los datos en los últimos tres años (1994-1996), fue recibida la siguiente lista de los contaminantes según su papel en el problema de calidad del aire en la ZMG: 1er. lugar: ozono, 2o. lugar: partículas menores de 10  $\mu m$ , 3er. lugar: monóxido de carbono, 4o. lugar: bióxido de nitrógeno. Es importante notar, que las estadísticas acumuladas por el período anterior (1975-1992) de las estaciones manuales determinaron como contaminantes de mayor problemática a los gases de bióxido de nitrógeno y de azufre. La diferencia obtenida entre estos dos periodos

TABLA IV. VALORES NORMADOS PARA LOS CONTAMINANTES (GONZÁLEZ 1995)

Contaminante	Valor norma	Período	Valor norma	Período	Normatividad
Ozono	0.110 ppm	1 hora			NOM-020-SSA1-1993
$SO_2$	0.130 ppm	24 horas	0.03 ppm	med. anual	NOM-022-SSA1-1993
$NO_2$	0.210 ppm	1 hora			NOM-023-SSA1-1993
$CO$	11.0 ppm	8 horas			NOM-021-SSA1-1993
$PM_{10}$	150.0 $\mu g/m^3$	24 horas	50 $\mu g/m^3$	med. anual	NOM-025-SSA1-1993

estuvo relacionada con el uso de diesel como combustible en fuentes fijas y móviles dentro de la ciudad en el periodo anterior (Zúñiga 1993). Además, concentraciones altas de aeropartículas observadas durante los meses de noviembre a marzo para ambos periodos mencionados, estuvieron condicionadas por la presencia de circulación anticiclónica durante el período de invierno, que produjo efectos de inversiones térmicas y altos índices de estabilidad de la atmósfera, que impidieron la dispersión de la contaminación y favorecieron su acumulación, provocando índices elevados de contaminación del aire (Jáuregui *et al.* 1992, Jáuregui 1997b, Davydova 1993). El bióxido de azufre no presenta actualmente ningún problema en la ZMG. Esto se encontró relacionado, según la información proporcionada por la COESE, con el cambio de combustible que se utiliza en la industria de la ZMG actualmente.

Los resultados de la investigación de distribuciones diurnas y anuales de los contaminantes permiten resaltar lo siguiente:

1. Los contaminantes monóxido de carbono, bióxido de azufre y aeropartículas tuvieron un máximo doble, el principal a las 9 y el secundario a las 21 horas (Fig. 8, curvas ■, ▲, —, respectivamente). Los dos máximos del comportamiento diurno coincidieron con las horas de mayor tráfico en la zona urbana (horas pico). La magnitud mayor del máximo en las horas matutinas se explicó por una gran estabilidad de la atmósfera matutina, que impidió la dispersión de los contaminantes.
2. El contaminante bióxido de nitrógeno también tuvo un máximo doble, en donde el principal se registró a las 10 y el secundario también a las 21 horas (Fig. 8, curva -◆-). Este sesgo horario probablemente está relacionado con pocos datos de mediciones durante los años 1994 y 1995 (perío-

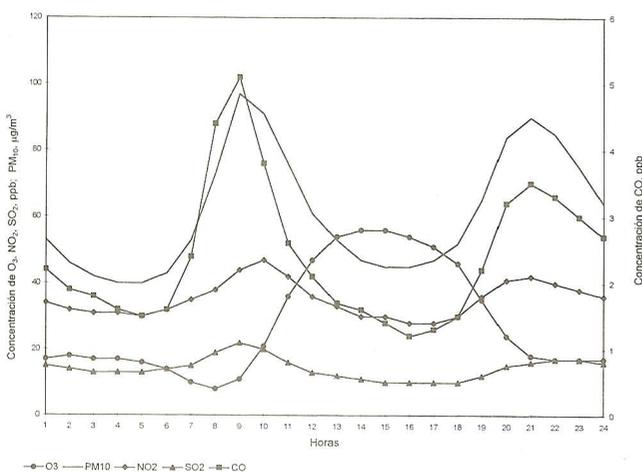


Fig. 8. Distribución diurna de CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> (PPB) y PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

dos de instalación y de calibración de los sensores de NO<sub>2</sub>).

3. El único máximo del ozono fue a las 14 horas y el mínimo a las 8, lo que estuvo relacionado con el comportamiento

diurno de radiación global y con la temperatura máxima sobre la latitud (Fig. 8, curva -●-).

4. El principal máximo en el comportamiento anual de los promedios mensuales de PM<sub>10</sub> y de CO se observó en enero y el segundo en mayo, en donde el máximo principal pudo ser explicado por el efecto de acumulación de los contaminantes en el transcurso de los meses de invierno en presencia de la circulación anticiclónica dominante y por lo tanto una atmósfera muy estable (Fig. 9, curvas — y -◆-).
5. En el caso del ozono se registró el único máximo en el mes de mayo, cuando se observaron el flujo máximo de radiación global y las temperaturas más altas en la región de estudio (Fig. 4, curva -●-).
6. El bióxido de nitrógeno tuvo el principal máximo en mayo igual que el ozono, pero además hubo un máximo secundario, registrado en enero (Fig. 9, curva -| -).

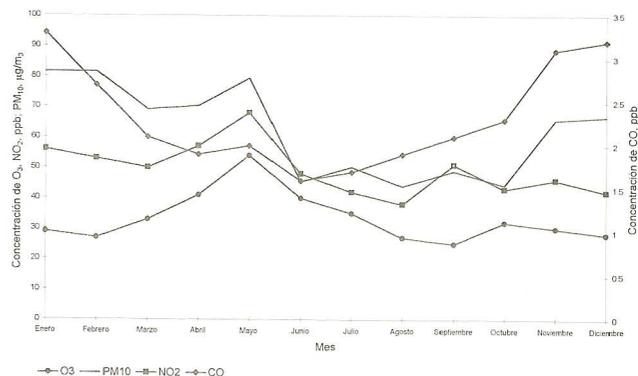


Fig. 9. Distribución anual de los principales contaminantes en la ZMG

Los contaminantes medidos en la red de monitoreo ambiental se deben a diferentes tipos de fuentes que se clasifican en dos grandes grupos: fijas (procesos industriales en empresas, fábricas, etc.) y móviles (automóviles, camiones urbanos, etc.). Según las estimaciones realizadas en el Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara el 63.8 % de monóxido de carbono (CO) fue emitido por el transporte (vehículos: 59.0 %, aviones: 2.4 %, ferrocarriles: 0.1 % y otro tipo de transporte motorizado: 2.3 %), mientras que el 19.3 % de emisiones de CO las causaron fuentes fijas tipo combustión de productos energéticos en las plantas estacionarias y 16.9 % de CO se emitió a la atmósfera de cualquier otra clase de origen natural o antrópico (incendios forestales, quema agrícola, etc.). Las emisiones de óxido de azufre por las fuentes fijas se dan por procesos de combustión de productos energéticos en 73.5 %, por procesos industriales en 22 %, por transporte en 2.4 % y el resto, 2.1 %, es de cualquier otro tipo de origen natural o artificial. La con-

TABLA V. CORRELACIONES ESPACIALES DE OZONO EN LA ZMG (18/05/96)

	AGU	ATM	CEN	LDO	MIR	OBL	TLA	VAL
AGU	1.0000	0.8964	0.8578	0.7300	0.7712	0.8482	0.9032	0.8979
ATM	0.8964	1.0000	0.9732	0.9009	0.6899	0.9311	0.9787	0.9807
CEN	0.8578	0.9732	1.0000	0.8731	0.6399	0.9426	0.9577	0.9815
LDO	0.7300	0.9009	0.8731	1.0000	0.6547	0.8421	0.9131	0.8545
MIR	0.7712	0.6899	0.6399	0.6547	1.0000	0.5590	0.7338	0.6467
OBL	0.8482	0.9311	0.9426	0.8421	0.5590	1.0000	0.9340	0.9667
TLA	0.9032	0.9787	0.9577	0.9131	0.7338	0.9340	1.0000	0.9631
VAL	0.8979	0.9807	0.9815	0.8545	0.6467	0.9667	0.9631	1.0000

taminación atmosférica por óxidos de nitrógeno se debe a las emisiones de fuentes fijas en 48.5 % por la combustión de los productos energéticos, en 3.9 % por procesos industriales y en 39.3 % por el transporte, del que los vehículos motorizados de gasolina y diesel provocaron hasta 32 % y 2.9 %, respectivamente; los ferrocarriles produjeron 1.9 % y otros transportes motorizados hasta 2.5 %. El resto de 8.3 % de óxidos de nitrógeno se emite por cualquier otra fuente de contaminación (incendios forestales, quema agrícola, etc.). El 31.4 % de la emisión de partículas suspendidas totales (PST) es debida a la combustión de productos energéticos, 26.4 % a los procesos industriales, 4.3 % al transporte, 3.9 % a la eliminación de desechos sólidos y 33.9 % a fuentes diversas (García 1997). El ozono se forma a partir de la reacción química, catalizada por la luz solar, entre el oxígeno molecular y el atómico es decir, el ozono es un contaminante fotoquímico secundario que se forma como consecuencia de la aparición en la atmósfera de oxidantes originados al reaccionar los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación solar (Brimblecombe 1986).

Para establecer el control de emisiones en la ZMG se pretende elaborar un modelo matemático de transporte y difusión de contaminantes (Skiba 1997). La realización adecuada de dicho modelo depende de la calidad y de la cantidad de los datos iniciales, por lo que fue muy importante realizar la estimación de la eficiencia de la red de monitoreo existente. Siguiendo al esquema de análisis de correlación espacial, fueron calculados los coeficientes de correlación para la información original sin corregir. Los resultados obtenidos indicaron lo siguiente:

- Para el bióxido de nitrógeno no se pudo encontrar una

correlación satisfactoria entre estaciones, debido a una falta grave de datos de mediciones en Las Aguilas y Tlaquepaque.

- Los mismos resultados se obtuvieron en el caso de la correlación de la matriz de observaciones sobre bióxido de azufre.
- Para recuperar los datos en las dos estaciones de la ZMG (AGU y TLA) se realizó la interpolación lineal a la matriz de datos originales y se aplicó el análisis de correlación espacial nuevamente sobre la matriz de datos recuperados. Sin embargo, la falta de información original impide la determinación del coeficiente de correlación espacial crítico para  $SO_2$ , ya que en algunos casos la varianza explicada tuvo valores cercanos a cero.
- Los resultados del análisis de correlación por ozono fueron muy satisfactorios (Tabla V). La varianza explicada calculada para cada una de las estaciones llegó hasta 0.96 (Tabla VI), lo que permitió calcular el coeficiente de correlación crítico para la ZMG y determinar la distancia óptima que debe existir entre cada par de estaciones de monitoreo.
- Mediante los cálculos correspondientes se determinó que el coeficiente de correlación crítico para determinar una distribución óptima de la red de mediciones fue de 0.87.

Con base en estos cálculos se pudo considerar que la red ambiental de la ZMG es satisfactoria siempre y cuando todas las estaciones funcionen al 100 % de su capacidad. Esto se demostró ampliamente después de aplicar el análisis de correlación espacial sobre la matriz de datos recuperados con técnicas de interpolación lineal. Sin embargo, para obtener una red eficiente es recomendable incrementar a 12 la cantidad de estaciones sobre el territorio creciente de la ZMG. Lo anterior

TABLA VI. VARIANZA EXPLICADA PARA OZONO EN LA ZMG (18/05/96)

	AGU	ATM	CEN	LDO	MIR	OBL	TLA	VAL
AGU	1.00	0.78	0.71	0.51	0.58	0.69	0.80	0.79
ATM	0.78	1.00	0.95	0.81	0.45	0.86	0.96	0.96
CEN	0.71	0.95	1.00	0.76	0.37	0.88	0.91	0.96
LDO	0.51	0.81	0.76	1.00	0.42	0.70	0.84	0.72
MIR	0.58	0.45	0.37	0.42	1.00	0.27	0.52	0.39
OBL	0.69	0.86	0.88	0.70	0.27	1.00	0.86	0.93
TLA	0.80	0.96	0.91	0.84	0.52	0.86	1.00	0.92
VAL	0.79	0.96	0.96	0.72	0.39	0.93	0.92	1.00

está en correspondencia con las normas de la Organización Mundial de la Salud (1974), según las cuales para una población de más de un millón de habitantes, pero menor de 5 millones, el número mínimo de estaciones recomendado es de 8 y el máximo de 12.

#### RECONOCIMIENTOS

Se agradece al Ing. Ramón González Núñez, Director de la Comisión Estatal de Ecología, al Ing. Ramón Limón, encargado de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) y a todo el personal de la RAMA de COESE, el apoyo brindado en el proceso del trabajo. Además, de reconocer al Quím. M. E. García (IAM, Universidad de Guadalajara) por su colaboración y ayuda en la realización de las estimaciones de los gases contaminantes en la ZMG y al Geog. V. M. Cornejo (IAM, Universidad de Guadalajara) por su apoyo en la construcción del mapa de topografía de la ZMG.

#### REFERENCIAS

- Alvarado Castellanos T. y Reyes Nodhal R. E. (1986). *Costos de la contaminación atmosférica en la zona industrial de Guadalajara*. Cuadernos de Difusión Científica, Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Brimblecombe P. (1986). *Air composition and chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Davenport A.G. (1963). The relationship of wind structure to wind loading. Proc. 1<sup>st</sup> Conference on Wind effects on building and structures, Teddington, E.U.A.
- Davydova V. (1993). Análisis de las inversiones térmicas en Guadalajara. *Horizonte* 337, 8-12.
- Davydova V. y Skiba Yu. N. (1999). Climate of Guadalajara City (Mexico); its variation and change within latest 120 years. *World Res. Rev.* 11(2), 258-270.
- Díaz Galindo S. (1934). *Sesenta años de observación pluviométrica en la ciudad de Guadalajara*. Talleres Gráficos de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Díaz Galindo S. (1946). *Geografía general y física del estado de Jalisco*. Talleres Gráficos de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Ezekiel M. (1941). *Methods of correlation analysis*. Wiley, Londres.
- García E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García M. E. (1997). Curso de contaminación en las grandes ciudades. Conferencia magistral, Universidad de Guadalajara-Ecología Estatal.
- González R. (1995). *Proyecto piloto para la creación de una normatividad ambiental metropolitana*. Ecología Estatal de Jalisco. Gobierno del Estado, Jalisco.
- Jáuregui E. (1988). Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin. *Atmósfera* 1, 131-140.
- Jáuregui E., Godínez L. y Cruz F. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmos. Environ.* 26B, 391-396.
- Jáuregui E. y Romales E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmosph. Environ.* 30, 3338-3389.
- Jáuregui E. (1997a). Climates of tropical and subtropical cities. En: *Climates and societies. A climatological perspective*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 361-373.
- Jáuregui E. (1997b). Heat island development in Mexico City. *Atmos. Environ.* 31, 3821-3831.
- Kincaid D. y Cheney W. (1994). *Análisis numérico. Las matemáticas del cálculo científico*. Addison-Wesley Iberoamericana, 406 p.
- Oke T., Zeuner G. y Jáuregui E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmos. Environ.* 26B, 433-444.
- Parra-Guevara D. y Skiba Yu. N. (2000). Optimización de emisiones industriales para la protección de zonas ecológicas. *Atmósfera* 13, 27-38.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1964). Plan Lerma (Asistencia Técnica). Meteorología, Boletín 1, Guadalajara, Jalisco, México
- Serón A., Pérez C. y Latorre A. (1993). Air quality monitoring: optimization of a network around a hypothetical potash plant in open countryside. *Atmos. Environ.* 27A, 729-738.
- Skiba Yu. N. (1993). Balanced and absolutely stable implicit schemes for the main and adjoint pollutant transport equations in limited area. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 9, 39-51.
- Skiba Yu. N. (1997). Air pollution estimates. *World Resour. Rev.* 9, 542-556.
- Zúñiga M. L. (1993). Análisis estadístico multivariable aplicado al problema de contaminación en Guadalajara. Tesis de Licenciatura en Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Guadalajara.