

Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México

Mario García¹, Héctor Ulloa¹, Hermes Ramírez¹, Miguel Fuentes², Silvia Arias³, Martha Espinosa¹

Departamento de Física¹, Departamento de Química² Departamento de Proyectos Urbanísticos³

Universidad de Guadalajara

Guadalajara, Jalisco, México

megarcia@astro.iam.udg.mx, hector@astro.iam.udg.mx, ramirez@astro.iam.idg.mx

Abstract— The aim of this work is to study the behavior of winds and their influence on air pollutants accumulation in the Guadalajara Metropolitan Zone during the period 2001-2010. Wind data (magnitude and direction) and air pollutants (particulate matter less than 10 microns, ozone, nitrogen dioxide, carbon monoxide and sulfur dioxide) from eight air monitoring stations of the Government of Jalisco were analyzed. The prevailing winds are calm winds; linked to urban growth and fossil fuel consumption are affecting air quality and population health.

Keywords— *Dominant winds, air pollutants, Guadalajara Metropolitan Zone*

Resumen— El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de vientos y su influencia en la acumulación de contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de Guadalajara durante el periodo 2001-2010. Se analizó la información del viento (magnitud y dirección) y de contaminantes atmosféricos (partículas menores a 10 micras, ozono, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y bióxido de azufre) de las ocho estaciones de monitoreo atmosférico del Gobierno de Jalisco. Los vientos dominantes son vientos calma, que vinculados al crecimiento urbano y al consumo de combustibles fósiles, comprometen la calidad del aire generando ambientes nocivos para la población.

Palabras clave— *Vientos dominantes, contaminantes atmosféricos, Zona Metropolitana de Guadalajara*

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de la atmósfera se manifiesta de forma diversa, incide directamente en el deterioro del medio ambiente y afecta la vida de las comunidades. Una variable que influye significativamente en la concentración y acumulación de contaminantes en el aire es la velocidad del viento. Las condiciones dominantes de flujo atmosférico transportan los contaminantes sin respetar límites físicos locales, regionales, nacionales e internacionales (Molina & Molina 2005). El tipo de influencia que un contaminante puede producir en una zona urbana depende del transporte desde su origen y del tiempo que permanezca en la atmósfera. Un ejemplo característico ocurre en las ciudades ubicadas en valles y con gran estabilidad atmosférica. Esta y otras características son comunes en la Zona Metropolitana de Guadalajara (caso de estudio). Sin embargo, se generan daños tanto locales como en extensas áreas geográficas, afectando la vegetación, los cuerpos de agua, los animales y la salud de las personas (Segala 1999, Ramírez et al. 2006).

Diversos trabajos han reportado que la meteorología influye en la acumulación, transporte y dispersión de contaminantes. Asimismo, el entorno físico natural y el crecimiento urbano afectan la calidad del aire de las grandes ciudades al prevalecer concentraciones elevadas de contaminantes (PNUMA 2011, Barry & Chorley 1999). Algunos estudios reportan que las fuentes móviles son el origen primario de la contaminación del aire en las grandes ciudades y en la mitad de ellas constituye la más importante (Molina & Molina 2005 y PNUMA 2011).

Céspedes (2005) reportó que los factores meteorológicos influyentes en la concentración de contaminantes en el aire son el transporte y dispersión, la turbulencia y limitaciones de dispersión vertical por inversión térmica. Además, existe la influencia de barreras al flujo de contaminantes y poca ventilación de algunas cuencas con capa de mezcla reducida y vientos débiles. Las inversiones térmicas se producen y acentúan por las características geográficas y topográficas de una zona (valles y laderas). Asimismo, la presencia de núcleos urbanos influye en el movimiento de las masas de aire al disminuir su velocidad y formar turbulencias (Molina & Molina 2005).

Los vientos se relacionan con la dinámica horizontal atmosférica y en función de ella se puede conocer la dirección de desplazamiento del contaminante, la rapidez de dispersión y la turbulencia. Los vientos locales desplazan el aire desde zonas de alta presión a baja presión determinando los vientos dominantes de un área. Estos vientos contribuyen en gran medida a la acumulación y/o dispersión de los contaminantes (Barry & Chorley 1999).

En condiciones de viento calma se exhibe una tendencia a amortiguar toda convección posible, lo que origina el fenómeno de inversión térmica que en el invierno puede persistir durante gran parte del día; los contaminantes emitidos en la capa invertida quedan atrapados, se acumulan y dispersan lentamente. Adicionalmente, los edificios atrapan el aire sobre el área interior y permanece en los cañones urbanos (Molina et al. 2009). La topografía también tiene influencia notable en la dispersión de contaminantes (Turtós y Díaz 2005).

A. Caso de estudio: Zona Metropolitana de Guadalajara

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) se localiza hacia el centro-occidente de México; tiene una población de 4'263,395 habitantes (INEGI 2010, COEPO 2010) y un parque vehicular de 2 millones de autos/día (SVT 2010) lo que representa el 92.5% de las emisiones de gases (PROAIRE 2011-2020, 2011). Se sitúa en la Cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en el Valle de Atemajac y la Planicie de Tonalá, rodeada de zonas montañosas como la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. Estas características identifican a la ZMG dentro de un valle semi-cerrado con predominio de vientos débiles y con la presencia del fenómeno de inversión térmica, la cual se presenta en aproximadamente 300 días al año. Además, Los sistemas anticiclónicos generados en el Golfo de México y en el Océano Pacífico influyen en la ZMG causando gran estabilidad atmosférica e impidiendo la mezcla vertical del aire.

Un estudio previo de la SEMARNAP/SS/GEJ (1997) reportó que los vientos dominantes corresponden a vientos calma con una frecuencia de 44.3%.

En ésta zona, las fuentes principales de emisión de contaminantes primarios a la atmósfera son las móviles (92.5 %), de área (4.5 %), fijas (2.5 %) y naturales (0.5 %) (PROAIRE 2011-2020, 2011). Es decir, el deterioro de la calidad del aire en la ZMG se relaciona principalmente con su crecimiento urbano y desarrollo tecnológico (Ramírez et al. 2009).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento temporal de los vientos dominantes y su influencia en la acumulación de contaminantes atmosféricos en la ZMG durante el periodo 2001-2010.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Geográficamente, la ZMG se ubica al centro del Estado de Jalisco, en la región centro-occidente de México; sus coordenadas extremas corresponden a latitud norte 20° 46' 00'', latitud sur 20° 32' 08'', longitud oriental 103° 12' 30'' y longitud occidental 103° 29' 00'', con una altitud promedio de 1 540 metros sobre nivel del mar. La zona incorpora los municipios de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan (Figura 1); dentro de sus límites se ubica la red automática de monitoreo de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas (Ramírez et al. 2008).

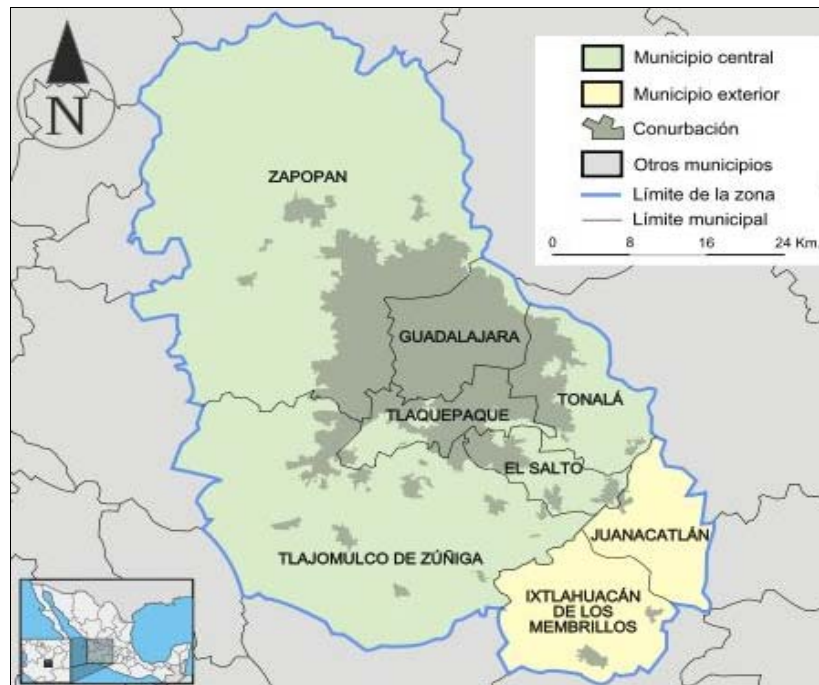


Fig. 1. Ubicación de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

En referencia a su orografía, la zona se sitúa en 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 circulan el área 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 Reina; al sur, El Cerro del Cuatro-Gachupin-Santa María; y al oeste, la Sierra de la Primavera (Figura 2). Este relieve constituye parcialmente una barrera física natural para la circulación del viento impidiendo la dispersión de contaminantes en el aire desde su fuente emisora al exterior de la metrópoli (SEMARNAP/SS/GEJ 1997).

Además, ésta zona se localiza dentro del cinturón solar global y por su latitud recibe radiación solar significativa (≈ 5.57 kWh/m²día) haciendo que su atmósfera sea altamente fotoreactiva (SENER 2010).

Lo antes mencionado permite visualizar de manera integral, la pertinencia de conocer el estado actual de la calidad del aire y de algunas magnitudes meteorológicas en la ZMG. Por ello, la Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Jalisco opera la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (SEMADES/GEJ-RAMA) con ocho estaciones distribuidas en la zona de estudio (Figura 3, Tabla 1), que miden los contaminantes atmosféricos denominados criterio; estos son, monóxido de carbono (CO en ppm), bióxido de nitrógeno (NO₂ en ppm), ozono (O₃ en ppm), bióxido de azufre (SO₂ en ppm) y partículas menores a 10 micras (PM₁₀ en µg/m³). La misma red evalúa algunas variables meteorológicas, entre ellas, la velocidad del viento (magnitud en km/h y dirección en grados), humedad (%), precipitación (mm) y temperatura (°C); sin embargo, la radiación solar no es reportada por las estaciones de la RAMA (Tabla 2).



Fig. 2. Orografía de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

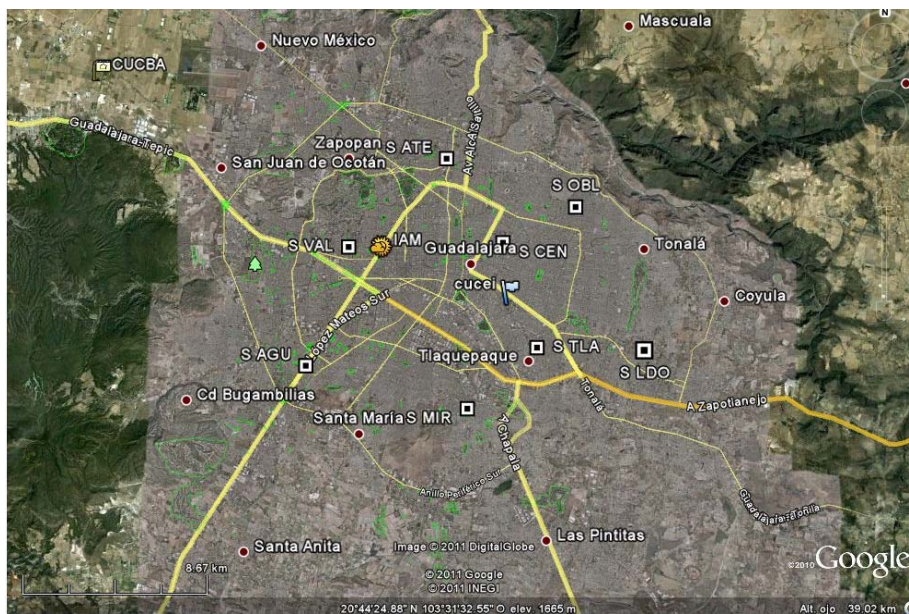


Fig. 3. Distribución de la red de estaciones de la SEMADES 2001-2010

Tabla I. Clave de identificación de las estaciones de la SEMADES/GEJ-RAMA

Estación	Centro	Vallarta	Águilas	Atemajac	Oblatos	Tlaquepaque	Loma dorada	Miravalle
Clave	CEN	VAL	AGU	ATE	OBL	TLA	LDO	MIR
Flujo vehicular	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Actividad Predominante	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial industrial	Comercial industrial	Artesanal Industrial	Industrial Artesanal Comercial	Industrial Comercial

Tabla II. Características de cada una de las estaciones de la red

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.
Óxidos de Nitrogeno (NO, NO ₂ y NO _x)	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: 0.0005-1 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.

Para cubrir el objetivo del presente estudio, de ésta RAMA se obtuvieron las bases de datos de contaminantes atmosféricos y velocidad del viento, misma que fue depurada (eliminando valores de cero y negativos), validada (en relación a la marcha diaria, mensual y anual) y procesada con métodos estadísticos.

A. Periodo de evaluación

Se obtuvo un mapa georeferenciando de la zona de estudio y la ubicación de las ocho casetas de monitoreo. Mediante la información de la RAMA se procesaron los datos de los vientos durante el período 2001-2010, reportándose como “rosa de los vientos” dominantes. Se obtuvieron promedios, máximos y mínimos diarios, mensuales y anuales. Asimismo, para el análisis de dirección de vientos se utilizaron 16 categorías, y para su rapidez, se clasificaron de acuerdo a la escala de Beaufort. Con la información de los cinco contaminantes (concentraciones promedio horarios) de las estaciones de la RAMA se obtuvieron tendencias medias, máximas y mínimas diarias, mensuales y anuales para todo el periodo y para cada contaminante.

III. RESULTADOS

A. Velocidad del viento: Dirección

Este estudio reporta que el viento dominante en el periodo 2001-2010 proviene del oeste-noroeste, oeste y oeste-suroeste con 13.17, 12.72 y 9.43 % respectivamente; en ese orden, le siguen los vientos del este-noreste, este y este-sureste con 5.62, 9.06 y 6.53 %. En ambos casos, sus velocidades son de 6 a 19 km h⁻¹ y, en forma temporal de 20 a 38 km h⁻¹. Asimismo, una influencia menor se identificó en dirección norte-noroeste, norte y norte-noreste con 2.94, 2.66 y 2.97 % respectivamente. Las direcciones sur-suroeste, sur y sur-sureste se comparten el 4.96, 4.39 y 3.43 % de la frecuencia total. Las direcciones noreste con 4.76 %, sureste con 4.31 %, noroeste con 6.75 % y suroeste con 6.30 % completan el análisis. Se encontró que en el periodo invierno-primavera, el viento muestra una circulación característica con frecuencia total de 24.08 % con flujos de vientos occidentales de direcciones oeste-suroeste, oeste y oeste-noroeste. En el periodo verano-otoño el viento manifestó una circulación con

frecuencia total de 16.2 %, indicando vientos orientales de direcciones noreste, este-noreste, este, este-sureste y sureste. Los vientos norte y sur comparten 8.33 % de la frecuencia total, siendo poco significativos en la circulación local (Figura 4); las frecuencias restantes correspondieron a las demás direcciones.

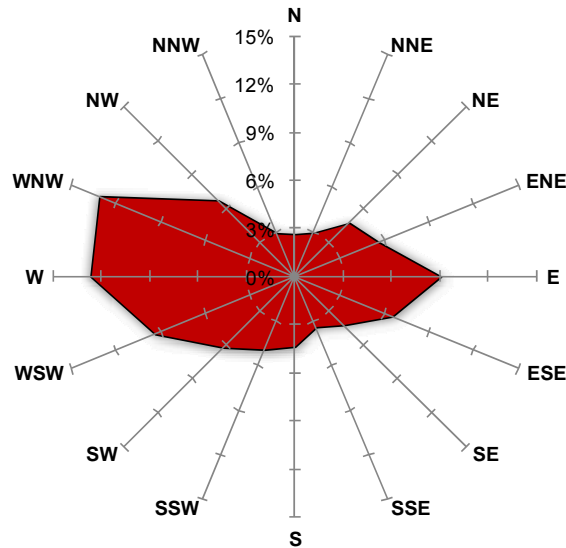


Fig. 4. Comportamiento del viento dominante en la ZMG (2001-2010).

B. Velocidad del viento: Magnitud

Los vientos se caracterizaron por un dominio de periodos de calmas entre 0 y 1 en la escala Beaufort: ausencia de viento y/o vientos débiles menores a 5 km h-1; es decir, una frecuencia promedio de 38.57 %. Esta rapidez de viento es propicia para la acumulación y concentración de contaminantes en la ZMG. La frecuencia mensual dominada por calmas ocurre de octubre a enero identificándose periodos de 38.56, 46.04, 43.92 y 41.81 %. Aunque los meses de junio, julio y agosto presentan frecuencias de calmas elevadas, el exceso de humedad y las lluvias limpian la atmósfera disminuyendo la contaminación. El periodo de reducción de calmas ocurre entre febrero y junio.

Se realizó una clasificación de frecuencias por intervalos diarios: madrugada (00:01-06:00) (Figura 5), mañana (06:01-12:00), tarde (12:01-18:00) y noche (18:01-24:00), observándose los periodos de calma más significativos entre la madrugada y la mañana con más del 50 %, contrario a la tarde y noche, donde incide el mayor flujo del viento (Figura 6).

Por año, los máximos de los vientos sostenidos se registraron en los años 2001, 2002 y 2003 con 34.15, 27.36 y 44.47 km h-1 respectivamente, mientras que, en los últimos tres años se presentaron las máximas mínimas (7 y 8 km h-1). La máxima media osciló entre 3.74 y 9.56 km h-1 y la media de 1.82 a 4.47 km h-1. Esta tendencia es una posible consecuencia de la orografía de la zona asociado al acelerado crecimiento urbano vertical cercano a las estaciones de monitoreo tal y como lo mencionan Henry & Heinke (1999) y Barry & Chorley (1999).

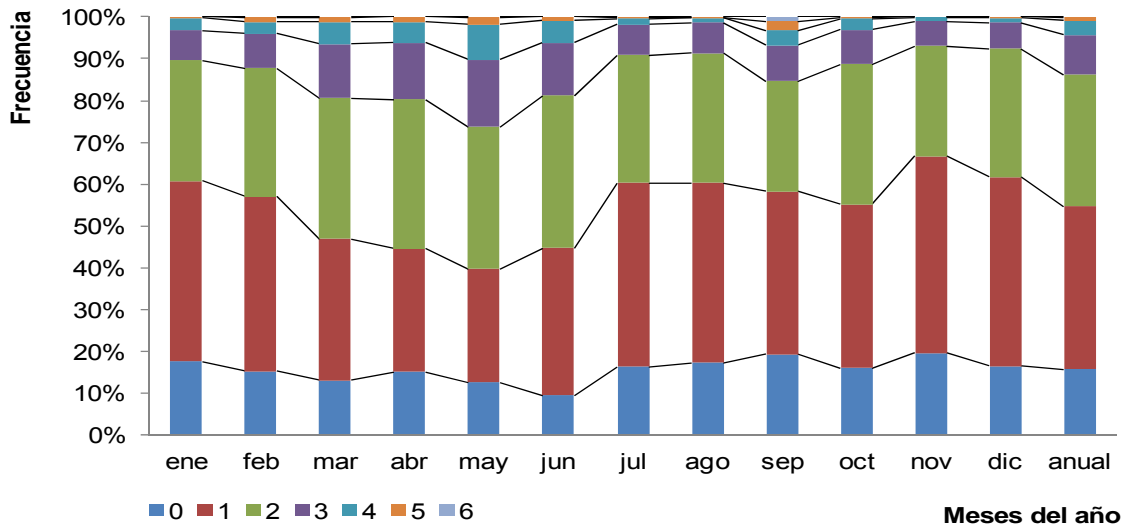


Fig. 5. Frecuencia de rapidez del viento (2001-2010): madrugada - escala Beaufort

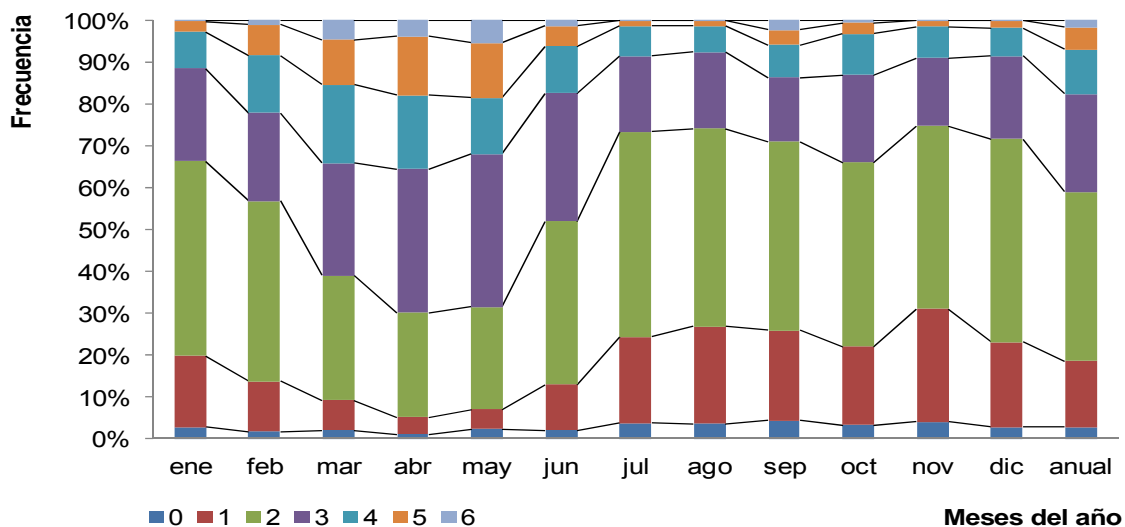


Fig. 6. Frecuencia de rapidez del viento (2001-2010): noche - escala Beaufort

Por mes, los máximos de los vientos sostenidos se identificaron en las estaciones LDO y AGU con 44.47 y 34.15 km h-1 respectivamente, las máximas medias de 4.62 a 5.77 km h-1 y las medias entre 2.12 y km h-1. El viento mostró dos periodos significativos. El primero definido entre 2001 y el primer semestre de 2004 caracterizado por un comportamiento cíclico con algunos picos máximos (hasta 45 km h-1); mientras que, de la segunda mitad del 2004 al 2010, se identificó una disminución importante y solo es posible observar algunos máximos entre 20 y 30 km h-1 (Figura 7).

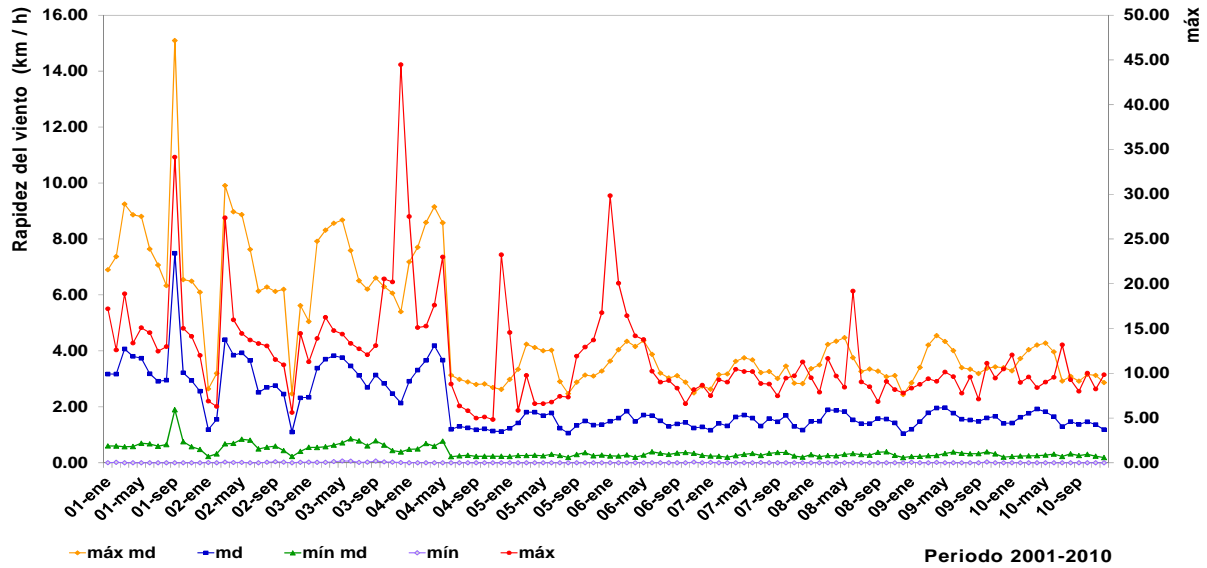


Fig. 7. Series de rapidez del viento máximas, medias y mínimas mensuales (2001-2010)

La Figura 8 ratifica la gran presencia de calma durante la madrugada y la mañana, intensificándose paulatinamente los vientos sostenidos a partir de las 09:00. Los vientos significativos se observaron entre las 18:00 y 22:00, luego se inicia un decremento de los mismos por enfriamiento de la superficie. Es necesario señalar que, aunque la escala Beaufort se clasifica desde 0 o viento calma h (<1 km h-1) hasta 12 o viento huracanado (188-133 km h-1), la zona de estudio es dominada por periodos de vientos calma y difícilmente se llegan a presentar picos superiores al nivel 6 (39-49 km h-1).

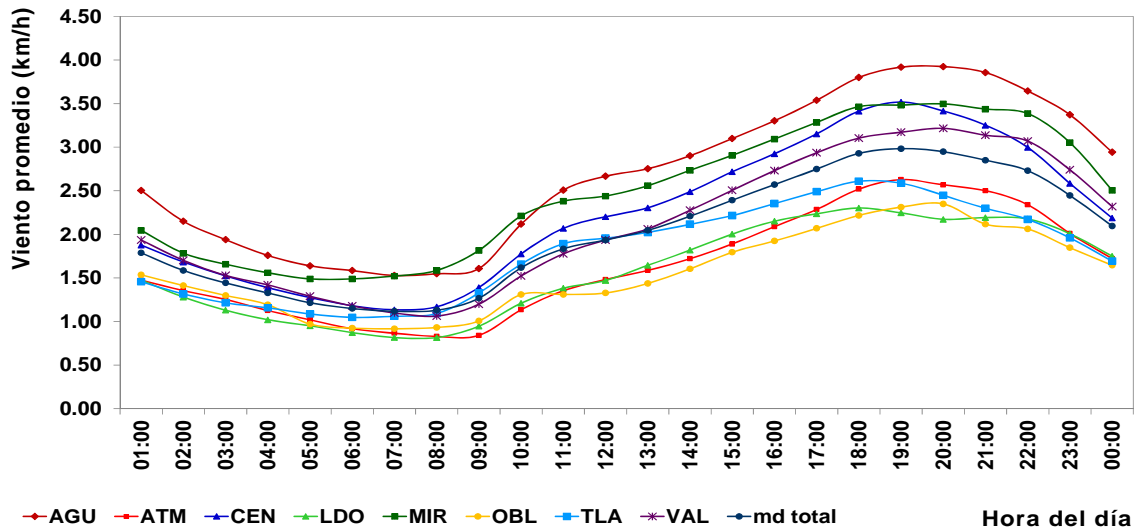


Fig. 8. Viento promedio diario (2001-2010)

C. Comportamiento de los contaminantes atmosféricos (diario, mensual y anual)

1) Partículas menores a 10 micras (PM10)

Durante el periodo 2001-2010, las concentraciones promedio diarias más elevadas ocurrieron en las estaciones MIR, LDO Y TLA (arriba de la norma OMS: 50 µg/m³) y picos arriba de la NOM (120 µg/m³). El horario de máximas correspondió a los intervalos de 07:00 a 11:00 y de 19:00 a 23:00 (Figura 9).

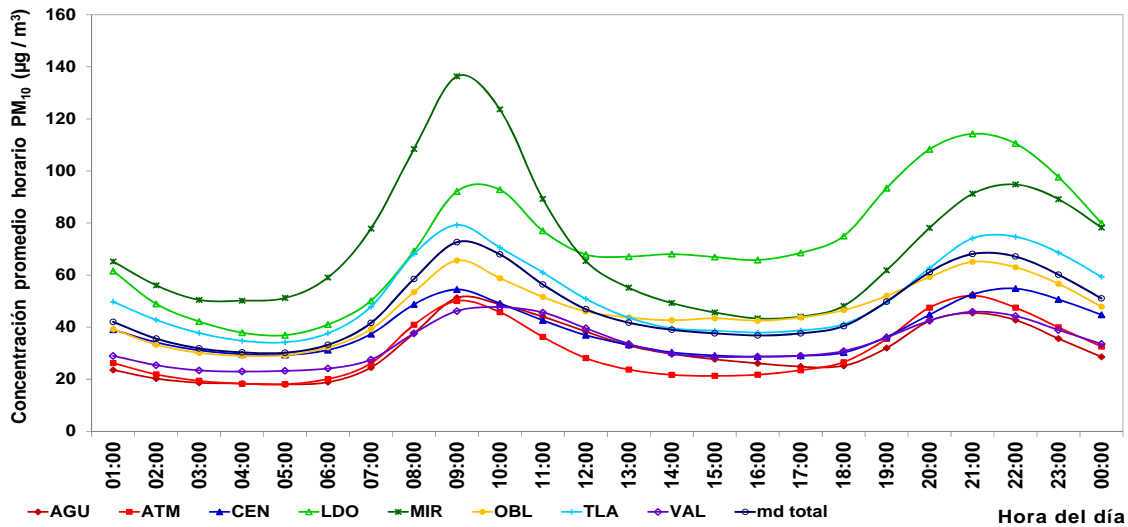


Fig. 9. Comportamiento promedio diario de PM10 (2001-2010)

Por mes, Todas las estaciones manifestaron concentraciones extremas de PM10 marcando una tendencia anual y por estación (desde 140 hasta 500 µg/m³). Las máximas se mantuvieron fuera de la OMS (25 veces), NOM (10 veces) y la EPA (10 veces). Los valores máximos promedio oscilaron de 43 a 188 µg/m³ y el promedio de 20 a 95 µg/m³ (Figura 10).

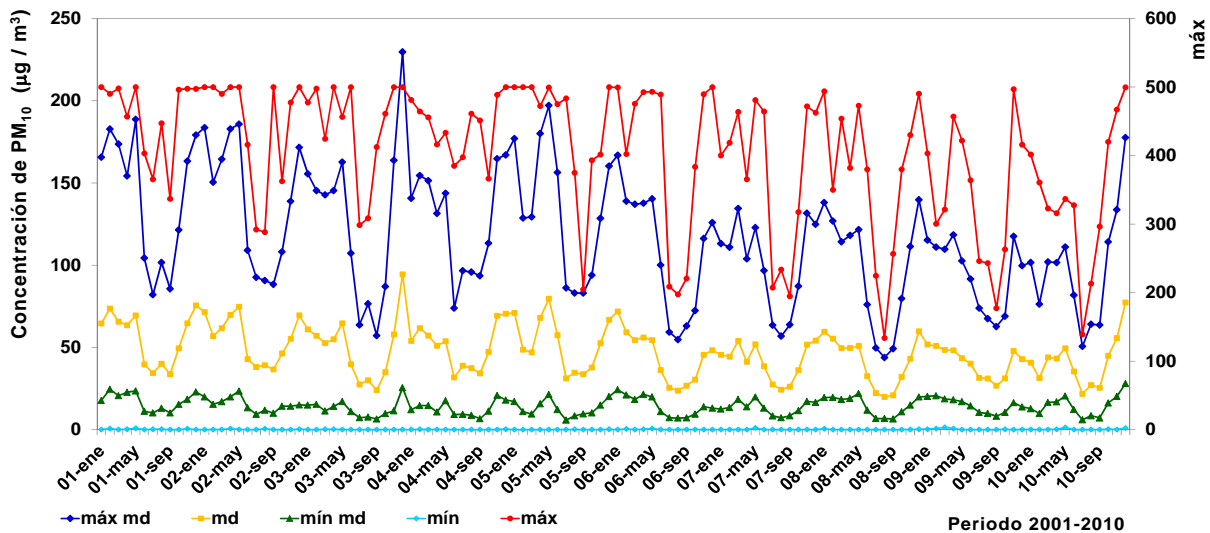


Fig. 10. Series de máximas, medias y mínimas mensuales de PM10 (2001-2010)

El periodo (2001-2010) mostró concentraciones fuera de las normas OMS (20 µg/m³/año), NOM (50 µg/m³/año) y EPA (50 µg/m³/año). Las máximas correspondieron al 2004 (499.8 µg/m³), seguido del 2003 (412.4 µg/m³), 2001 (403.3 µg/m³) y 2007 (347.9 µg/m³). Aunque se observó una disminución (137.7 µg/m³), estas continúan fuera de norma. Las máximas medias oscilaron entre 46 y 115 µg/m³, mientras que, las medias variaron de 20 a 45 µg/m³.

2) Ozono (O₃)

El O₃ reportó las concentraciones máximas en las estaciones CEN, OBL Y LDO entre las 12:00 y 18:00 debido a la mayor presencia de radiación solar, que por la ubicación de la ZMG (latitud 20° N), es un factor dominante en las reacciones fotoquímicas para la generación de este contaminante secundario. Las mínimas ocurrieron en la madrugada y la mañana; en su comportamiento promedio diario, el O₃ se localizó dentro de las normas EPA (0.12 ppm) y NOM (0.11 ppm) durante los 10 años analizados (Figura 11).

Por mes, Las ocho estaciones mostraron concentraciones de O₃ fuera de norma; 3 veces superiores a la NOM y 2.8 arriba de la EPA (Figura 12). Las concentraciones máximas oscilaron desde 0.0950 hasta 0.2870 ppm. Las máximas promedio variaron de 0.0364 a 0.1110 ppm; mientras que, las medias mensuales presentaron rangos de 0.0171 a 0.0520 ppm. Las concentraciones medias expresan variaciones estacionales con un comportamiento constante durante todo el periodo, aunque con una ligera tendencia positiva en los últimos años, siendo más notorio el 2010. Los picos máximos de O₃ se observaron durante el estiaje, caracterizados por mayor radiación solar en el área y gran presencia de NO_x. Este contaminante es un factor de riesgo para la población durante esta época del año.

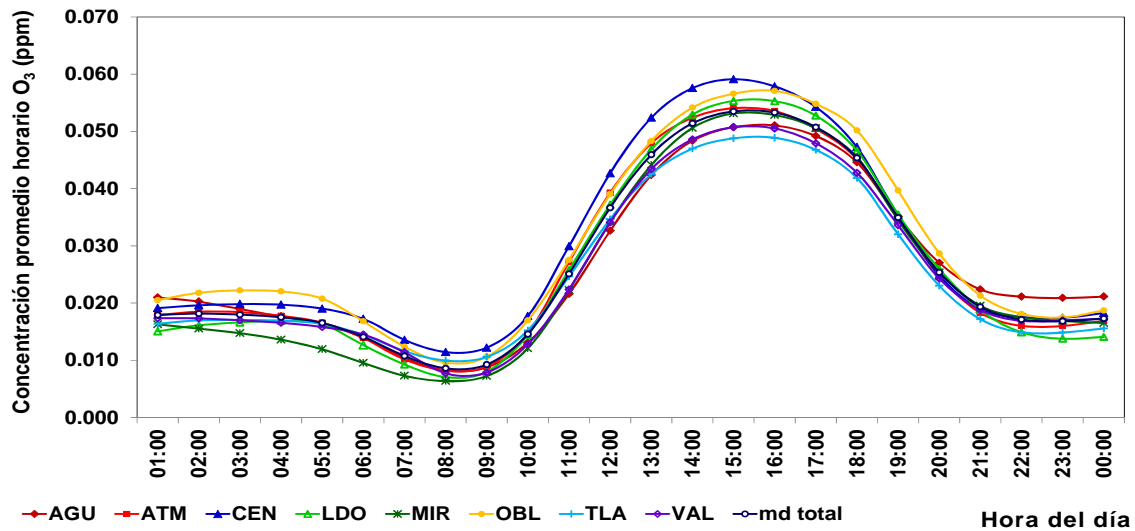


Fig. 11. Comportamiento promedio diario de O₃ (2001-2010)

Por año, las concentraciones máximas se localizaron en el año 2005 (0.2290 ppm), 2010 (0.2280 ppm), 2009 (0.1770 ppm) y 2008 (0.1890 ppm); fuera de la NOM y EPA (Tabla 3). Las máximas promedio oscilaron de 0.0512 a 0.0764 ppm y las medias de 0.0244 a 0.0338 ppm.

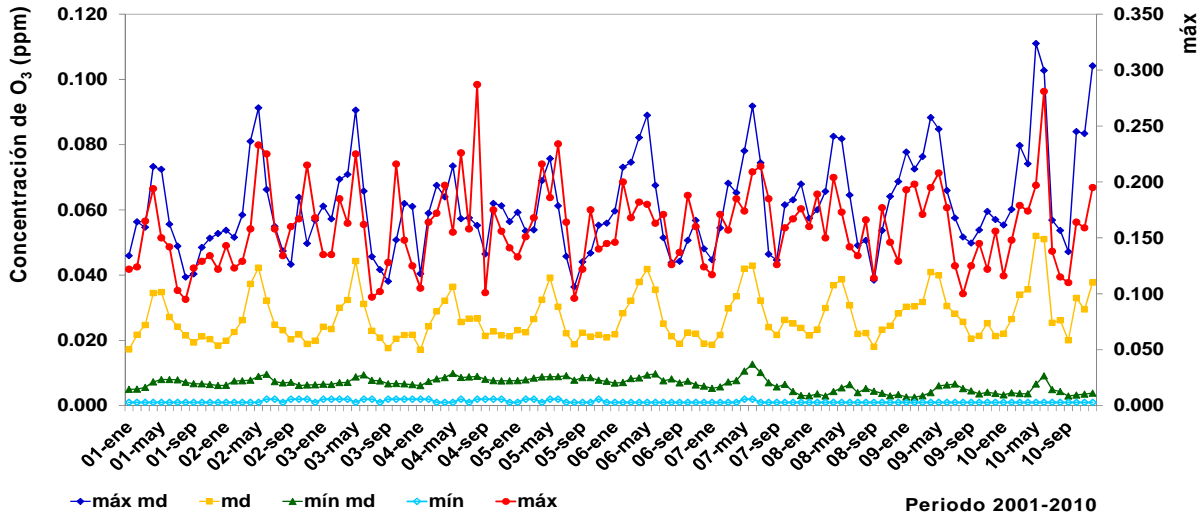


Fig. 12. Series de máximas, medias y mínimas mensuales de O3 (2001-2010)

3) Monóxido de Carbono (CO)

El CO promedio diario presentó dos picos de concentraciones máximas; el primero, entre las 07:00 y 10:00 (ATE, TLA y LDO) y el segundo, entre las 20:00 y 23:00. Aunque el área más afectada se localizó al norte, centro y sureste de la ZMG, se observó que la contaminación es significativa durante la ocurrencia de picos máximos (Figura 13). En el periodo analizado se mantuvo dentro de la normatividad OMS, EPA y NOM. Por mes, las concentraciones máximas rebasaron la NOM en un 50 % y la OMS EPA en un 75 %. Las concentraciones máximas oscilaron de 4.50 a 53.50 ppm. Estos máximos equivalen a 4.8 veces la NOM y 6 veces la OMS y EPA (Tabla 3), por lo que estos lapsos representan factores de riesgo para la población. Estos eventos se registraron en los periodos más secos (marzo, abril, mayo y junio). Las máximas promedio variaron de 2.1167 a 7.3849 ppm y las medias mensuales en rangos de 0.9031 a 2.9734 ppm (Figura 14).

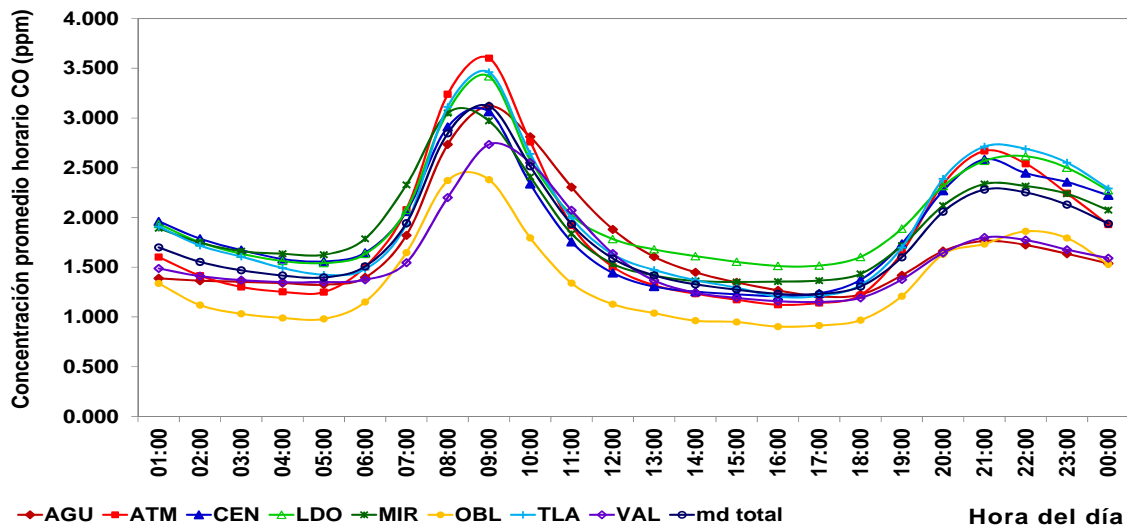


Fig. 13. Comportamiento promedio diario de CO (2001-2010)

Por año, las concentraciones máximas ocurrieron en el año 2001 (53.50 ppm – estación OBL) y 2002 (47.20 ppm – estación VAL); 5.9 veces arriba de la OMS, y EPA y 4.8 veces por arriba de la NOM. Aunque es posible observar una tendencia negativa en sus máximos extremos, los promedios mostraron una estructura homogénea. Las máximas promedio oscilaron de 3.0327 a 4.9303 ppm y los promedios de 1.2839 a 2.3065 ppm. La diferencia marcada entre máximos extremos, máximos promedio y promedio, manifiestan la presencia de picos durante intervalos de tiempo cortos. Las ocho estaciones mostraron concentraciones fuera de norma, siendo la mayor afectación al sur-sureste al este-noreste.

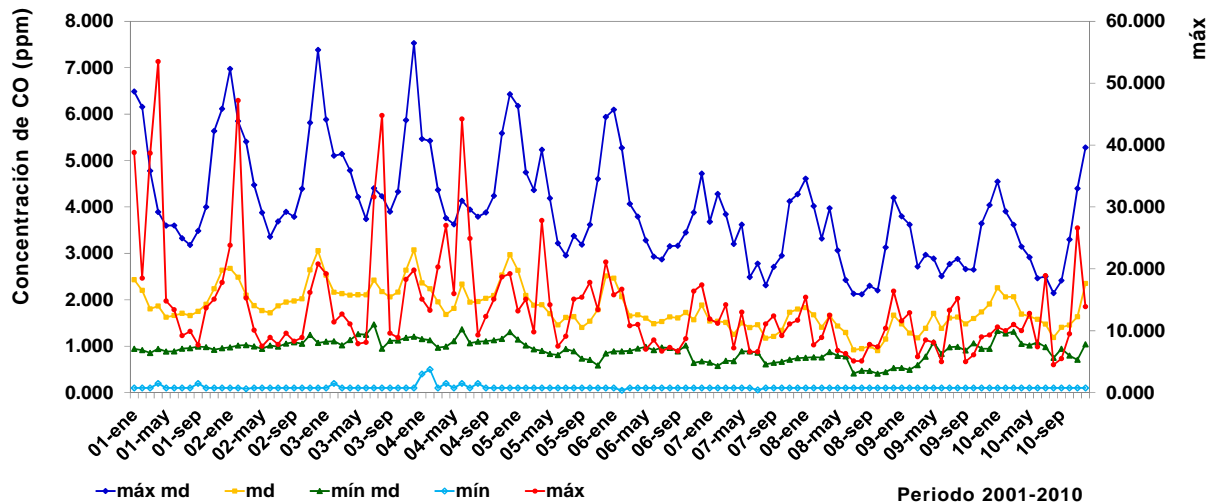


Fig. 14. Series de máximas, medias y mínimas mensuales de CO (2001-2010)

4) *Bióxido de Nitrógeno (NO2)*

El NO2 mostró dos picos de concentraciones máximas; la primera, de las 07:00 a las 12:00 y la segunda, entre las 19: y 24:00 (Figura 15). Los valores máximos se presentaron en las estaciones ATE, CEN y AGU. Se observaron concentraciones promedio dentro de la normatividad OMS (0.106 ppm), EPA (0.25 ppm) y NOM (0.21 ppm).

Mensualmente, las concentraciones máximas rebasaron las normas de la OMS, EPA y NOM en un 32 % del periodo analizado. Los valores extremos oscilaron desde 0.0630 hasta 0.5230 ppm; estos últimos, representan factores de riesgo para la población. Las máximas promedio variaron de 0.0290 a 0.0951 ppm y las medias mensuales en rangos de 0.0155 a 0.0513 ppm (Figura 16). El análisis de todo el periodo definió un ligero descenso tanto en las concentraciones máximas como en las promedio; sin embargo, a finales del año 2010 inició nuevamente una tendencia positiva.

En el comportamiento anual, las concentraciones máximas ocurrieron en el año 2001 (0.5210 ppm), 2002 (0.4260 ppm), 2003 (0.5230 ppm) y 2004 (0.4190 ppm). Las máximas promedio variaron de 0.0420 a 0.0644 ppm y los promedios oscilaron entre 0.0219 y 0.0399 ppm. Toda la ZMG experimentó concentraciones máximas fuera de norma, 22.7 veces por encima de la OMS y 10 veces por arriba de la EPA (Tabla 3); las máximas extremas ocurrieron en las estaciones VAL (0.5230 ppm), OBL (0.5210 ppm), LDO (0.4960 ppm) y ATE (0.4800 ppm).

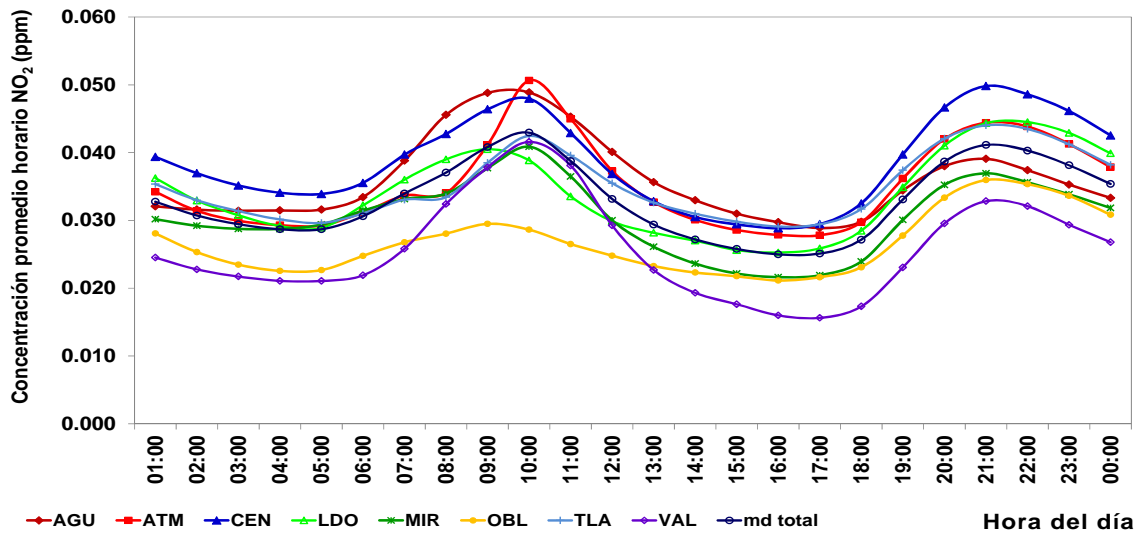


Fig. 15. Comportamiento promedio diario de NO2 (2001-2010)

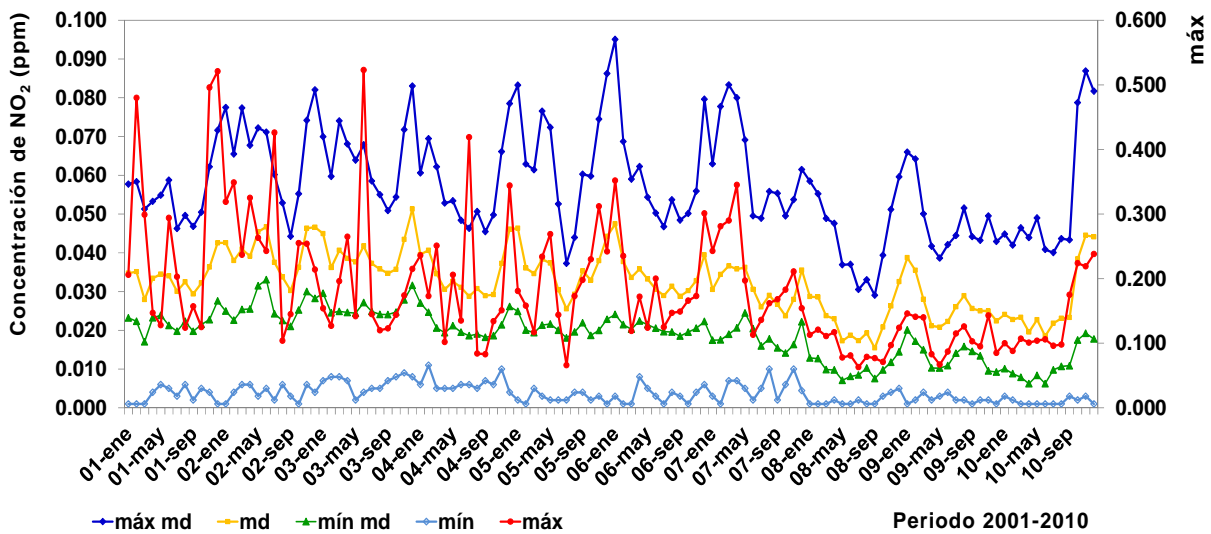


Fig. 16. Series de máximas, medias y mínimas mensuales de NO2 (2001-2010)

5) *Bióxido de azufre (SO2)*

Las concentraciones promedio diario mostraron picos máximos característicos entre las 08:00 y 12:00 en todas las estaciones, siendo su comportamiento en todo el periodo. Los valores más elevados se observaron en las estaciones CEN, AGU y MIR de la ZMG (Figura 17). Estos resultados se localizaron dentro de la NOM (0.13 ppm) y de la EPA (0.14 ppm) pero fuera de la norma OMS (0.007 ppm).

Por mes, se observó que aproximadamente el 28 % de las concentraciones extremas del SO2 rebasaron la NOM y EPA, mientras que el 100 % superó la de la OMS. Las máximas oscilaron desde 0.020 hasta 0.5240 ppm; estos últimos representan factores de riesgo para la población. Las máximas promedio variaron de 0.0024 a 0.0321 ppm y los promedios mensuales en rangos de 0.0015 a 0.0134 ppm (Figura 18). Del año 2001 a la primera mitad del 2006 se localizaron los niveles más significativos,

seguidos de una tendencia negativa; sin embargo, a finales del año 2010 se observó nuevamente una tendencia positiva.

Tabla 3. Estándares de calidad del aire para indicadores de contaminación (valores promedio).

Indicador de contaminación	Organización Mundial de la Salud (OMS)*		Agencia de Protección Ambiental (EPA)*		Normas Oficiales Mexicanas (NOM) - DOF (1994)	
	ppm	µg/m ³	ppm	µg/m ³	ppm	µg/m ³
Ozono (O ₃)	-	-	0.12 (1 h)	235	0.11 (1 h)	215
Monóxido de carbono (CO)	0.05 (8 h)	10290	0.075 (8 h)	150	0.08 (8 h)	157
	26 (1 h)	29725	35 (1 h)	40000	11 (8 h)-(1/año)	12595
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.106 (1 h)	200	0.25 (1 h)	470	0.21 (1 h)-(1/año)	395
	0.023 (anual)	40	0.053 (anual)	100	-	-
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.007 (24 h)	20	0.14 (24 h)	365	0.13 (24 h)-(1/año)	341
	0.191 (10 min)	500	0.03 (anual)	80	0.03 (anual)	80
Material particulado respirable (PM ₁₀)	-	50 (24 h)	-	150 (24 h)	-	120 (24 h)
	-	20 (anual)	-	50 (anual)	-	50 (anual)
Material particulado fino (PM _{2.5})	-	25 (24 h)	-	35 (24 h)	-	65 (24 h)
	-	10 (anual)	-	15 (anual)	-	15 (anual)

*Mihelcic & Zimmerman 2012

ppm: partes por millón, µg/m³: microgramos/metro cúbico

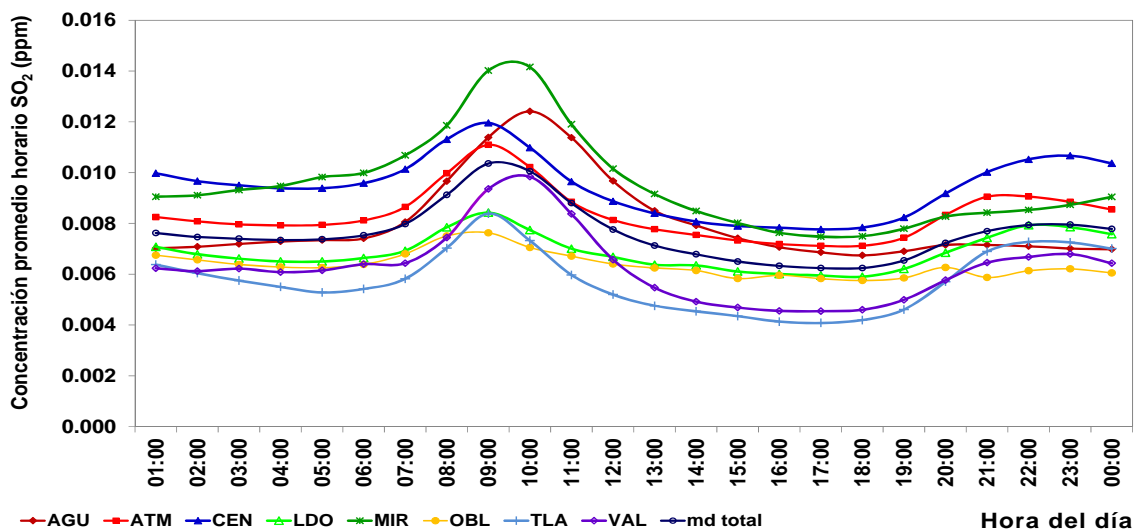


Fig. 17. Comportamiento promedio diario de SO2 (2001-2010)

Anualmente, la ocurrencia de concentraciones máximas extremas se identificaron en los años 2001 (0.2960 ppm), 2002 (0.5340 ppm), 2004 (0.4120 ppm) y 2010 (0.1780 ppm); estos, correspondieron a niveles superiores a la NOM y EPA muy superiores a la de la OMS (Tabla 3). Las máximas promedio oscilaron de 0.0076 a 0.0205 ppm y los promedio de 0.0037 a 0.0112 ppm. Todas las estaciones presentaron concentraciones máximas de SO2 fuera de las normas. Se identificaron los niveles extremos en OBL (0.5340 ppm), VAL (0.5330 ppm), MIR (0.5150 ppm) y AGU (0.4120 ppm).

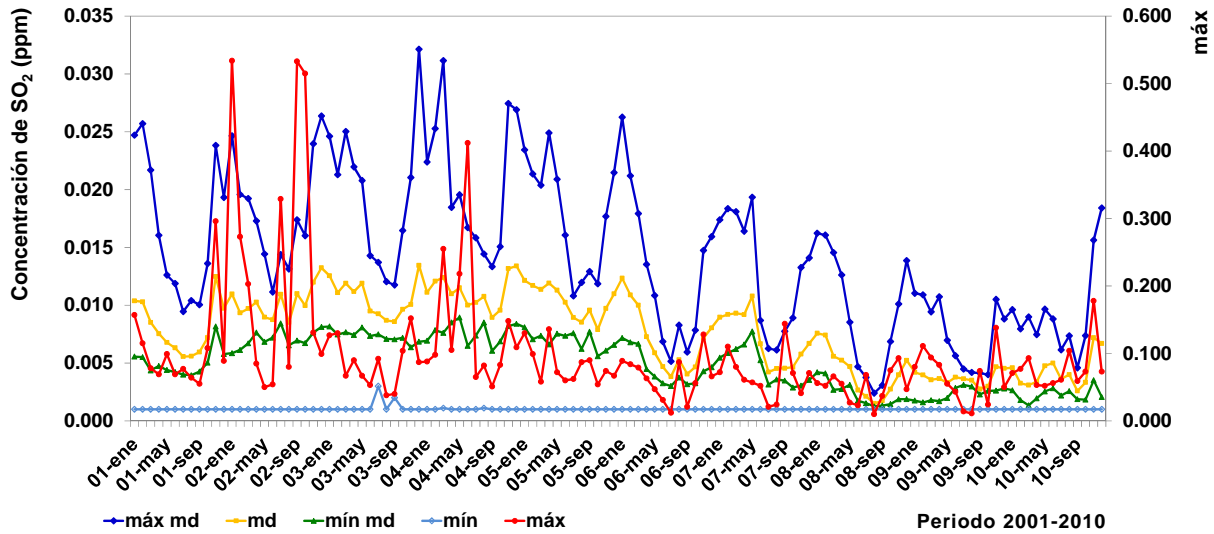


Fig. 18. Series de máximas, medias y mínimas mensuales de SO2 (2001-2010)

IV. DISCUSIÓN

La frecuencia promedio de vientos calma en el periodo fue de 38.57 %, de los cuales más del 50 % se registraron en la madrugada y en la mañana (Figura 5); esto es un indicador del gran potencial de contaminantes que se pueden concentrar en la zona. La ausencia de ventilación evita que se propicie transporte y dispersión a distancia; aunque por la tarde y noche ocurre un aumento gradual de flujo del viento, éste no es lo suficientemente significativo para dispersar los contaminantes fuera de la metrópoli. Además de las condiciones de viento calma, la ubicación geográfica (relieve) y la creciente urbanización de la ZMG influyen en la inhibición del mezclado vertical del aire, modificando la dinámica local y acentuando los problemas de contaminación por efecto de la inversión térmica, tal como lo reportan Henry & Heinke (1999) y Barry & Chorley (1999).

Para observar algunas correlaciones entre la Velocidad (WS) y dirección del viento (WD) y contaminantes atmosféricos (medias y máximos mensuales de CO, SO2, NO2, PM10 y O3), además de, inversión térmica, Temperatura (T °C) y Humedad relativa (HR), mediante regresión simple y múltiple, análisis de varianza (ANOVA) y prueba t, se mostraron las significancias más altas para las medias mensuales, seguida de los máximos entre los años 2002 y 2010. En el análisis y diagnóstico de la Tabla 4 se observa que:

Las inversiones térmicas (IT) muestran correlación significativa con los contaminantes atmosféricos durante los 8 años analizados, siendo más importante con las PM10 seguido del NO2, SO2, CO y O3.

A excepción del año 2006, la temperatura (T °C) también se correlaciona con las IT (inversamente proporcional); a medida que la temperatura aumenta con la altura, la inversión térmica es más importante.

Por su parte, la humedad relativa (HR) es la que muestra mayor correlación (inversamente proporcional), es decir, a medida que la atmósfera es más seca, la inversión térmica es más importante.

La velocidad del viento (WS), se correlaciona con las inversiones en los años 2002, 2005, 2006 y 2008, mientras que la dirección del viento (WD) lo hace en los 8 años, siendo más relevante en 2005.

La presencia de una variable se relaciona con la presencia de otras, lo que puede potenciar o contrarrestar sus efectos (efecto sinérgico).

En el caso del CO, NO₂, NO_x, O₃, PM₁₀ y SO₂, muestran correlación significativa con todas las variables en alguno de los 8 años analizados.

De igual forma, la T °C, HR, WS y WD, observan relación significativa con los contaminantes.

La SEMARNAP/SS/GEJ (1997) realizó un estudio sobre los vientos en la ciudad de Guadalajara en el periodo 1985-1990. Reportaron un viento dominante del oeste con 15.5 % de la frecuencia total, seguido de vientos del este (7.5 %); ambos con rapidez de 5 a 20 km h⁻¹ y, en forma temporal de 21 a 35 km h⁻¹. Los períodos de calma (ausencia de viento y vientos débiles menores a 4 km h⁻¹) mostraron una frecuencia del 44.3 %. Los vientos del norte y sur compartieron el 5 % de la frecuencia total, representando incidencia poco importante en la circulación local. Sin embargo, no se plantea la metodología utilizada y el número de estaciones utilizadas.

Precisamente, la concentración de contaminantes atmosféricos observó un comportamiento variable, no obstante, las PM₁₀ mostraron las más elevadas seguidas del O₃, NO₂, CO y SO₂, lo que coincide con lo reportado por Ramírez et al (2009) y Ramírez et al (2006). Las zonas más afectadas correspondieron al cuadrante sureste (estaciones MIR, TLA, LDO); aquí se localizaron las estaciones más recurrentes donde un porcentaje importante de días superan la NOM. Los niveles elevados de PM₁₀ son consecuencia de las constantes emisiones antrópicas tanto por fuentes móviles, fijas y de aerosoles de origen diverso, que asociadas a largos periodos de viento calma y presencia de inversiones térmicas fuertes permiten la acumulación de los mismos. Además, fue posible observar que el comportamiento promedio diario durante el periodo corresponde a la sinergia entre los factores mencionados anteriormente, las cuales son más significativas durante la mañana. Las PM₁₀ fueron el contaminante más significativo y con las concentraciones más elevadas, lo que representa un factor de riesgo para la población de la ZMG. Los episodios extremos se localizaron al sureste, lo que muestra similitud con lo encontrado por Ramírez et al (2009) y Ramírez et al (2006).

Los meses de abril a junio reportaron elevada concentración de O₃ y CO, mientras que de diciembre a marzo revelaron concentraciones altas de PM₁₀, seguidas de NO₂, CO y SO₂. De esto último, una característica implícita es el gradiente de temperatura de las inversiones térmicas que oscilan entre 1 a 12 °C acentuando la duración de las mismas hasta las primeras horas de la tarde.

El O₃ observa una tendencia creciente en los últimos años, situación que puede empeorar debido al continuo crecimiento urbano desordenado y al incremento de las fuentes contaminantes (móviles y fijas), en donde la influencia de la radiación solar es significativa debido a que actúa como catalizador en la formación de ozono a partir de los contaminantes primarios (NO₂ y COV) acentuando aún más el problema. El O₃ mostró mayor influencia al centro y sureste, distinguiéndose como un factor de riesgo para la población, particularmente, cuando la atmósfera es altamente fotoreactiva (12:00 a 18:00). Las concentraciones medias reportaron un comportamiento cíclico durante todo el periodo, mientras que, las máximas medias evidenciaron una ligera tendencia creciente sobretodo en el año 2010. Los picos máximos se observaron en los intervalos de estiaje y en verano, caracterizados por mayor radiación solar y reacción química con los contaminantes primarios.

El análisis del CO precisó un ligero descenso en los valores medios durante los primeros ocho años; sin embargo, en los últimos dos se observó una tendencia creciente. El aumento en el consumo de combustibles fósiles es un factor que incide en los procesos de contaminación por CO dado que es el que más se emite; esto constituye un riesgo para el bienestar de la población.

Por su parte, el NO2 reportó que los valores máximos se pueden presentar tanto en invierno como en verano. Aunque se observó una ligera tendencia a disminuir en los primeros siete años, al final del periodo se revierte y en prácticamente todas las estaciones se presentan máximos extremos. Precisamente, la contaminación por NO2 sigue agudizándose y es clave en la generación de otros contaminantes secundarios (O3) lo cual implica un riesgo en la población de la ZMG. Finalmente, el SO2 es un contaminante que tiene su procedencia principal de las fuentes fijas y aunque su análisis mostró una tendencia constante, los resultados reportaron una ligera disminución en sus niveles medios, particularmente en los últimos años. Sin embargo, aunque las concentraciones promedio diarias se mantuvieron dentro de la NOM, este contaminante se considera nocivo para la población de acuerdo a la OMS (0.007 ppm/24 h).

Tabla 4. Correlaciones entre las variables analizadas

2002	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.4092	0.3340	0.2105	0.6073	0.2006	-0.1144	-0.8927	0.1145	0.4698
CO	0.4092	1.0000	0.1109	-0.4863	0.4533	0.2187	-0.6778	-0.1587	-0.4117	0.0652
NO ₂	0.3340	0.1109	1.0000	0.1363	0.1488	0.0610	-0.0642	-0.2911	0.0362	0.1314
O ₃	0.2105	-0.4863	0.1363	1.0000	0.1776	-0.1051	0.8180	-0.4150	0.3141	0.3344
PM ₁₀	0.6073	0.4533	0.1488	0.1776	1.0000	0.0426	-0.0197	-0.5464	0.1647	0.6316
SO ₂	0.2006	0.2187	0.0610	-0.1051	0.0426	1.0000	-0.2836	-0.0553	0.3984	-0.0479
T °C	-0.1144	-0.6778	-0.0642	0.8180	-0.0197	-0.2836	1.0000	-0.1706	0.3349	0.2624
RH	-0.8927	-0.1587	-0.2911	-0.4150	-0.5464	-0.0553	-0.1706	1.0000	-0.2451	-0.5776
WS	0.1145	-0.4117	0.0362	0.3141	0.1647	0.3984	0.3349	-0.2451	1.0000	0.3824
WD	0.4698	0.0652	0.1314	0.3344	0.6316	-0.0479	0.2624	-0.5776	0.3824	1.0000
2003	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.1700	0.3900	0.3743	0.6763	0.5016	-0.2411	-0.8497	0.0350	0.4072
CO	0.1700	1.0000	0.3127	-0.2507	0.3547	0.0414	-0.4079	0.0843	-0.3361	0.0008
NO ₂	0.3900	0.3127	1.0000	0.0475	0.3958	0.2276	-0.5120	-0.2833	-0.1566	0.1572
O ₃	0.3743	-0.2507	0.0475	1.0000	0.2159	0.3320	0.5556	-0.6249	0.4155	0.5180
PM ₁₀	0.6763	0.3547	0.3958	0.2159	1.0000	0.5234	-0.2637	-0.5388	0.1851	0.4378
SO ₂	0.5016	0.0414	0.2276	0.3320	0.5234	1.0000	-0.1886	-0.4597	0.4192	0.2808
T °C	-0.2411	-0.4079	-0.5120	0.5556	-0.2637	-0.1886	1.0000	-0.0298	0.3513	0.2725
RH	-0.8497	0.0843	-0.2833	-0.6249	-0.5388	-0.4597	-0.0298	1.0000	-0.1923	0.5622
WS	0.0350	-0.3361	-0.1566	0.4155	0.1851	0.4192	0.3513	-0.1923	1.0000	0.4010
WD	0.4072	-0.0008	0.1572	0.5180	0.4378	0.2808	0.2725	-0.5622	0.4010	1.0000
2004	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.2338	0.5945	0.0652	0.4467	0.2728	-0.4184	-0.7591	-0.0496	0.2494
CO	0.2338	1.0000	0.4343	-0.2231	0.1385	-0.0506	-0.4618	0.1174	-0.5530	0.2228
NO ₂	0.5945	0.4343	1.0000	-0.0970	0.2799	0.1923	-0.4741	-0.3947	-0.2472	0.1347
O ₃	0.0652	-0.2231	-0.0970	1.0000	-0.1640	0.1424	0.2735	-0.2114	0.2596	0.1729
PM ₁₀	0.4467	0.1385	0.2799	-0.1640	1.0000	0.3892	-0.0341	-0.4914	0.1295	0.4344
SO ₂	0.2728	-0.0506	0.1923	0.1424	0.3892	1.0000	0.0452	-0.4359	0.3226	0.3161
T °C	-0.4184	-0.4618	-0.4741	0.2735	-0.0341	0.0452	1.0000	0.0219	0.3210	0.2556
RH	-0.7591	0.1174	-0.3947	-0.2114	-0.4914	-0.4359	0.0219	1.0000	-0.1654	0.5154
WS	-0.0496	-0.5530	-0.2472	0.2596	0.1295	0.3226	0.3210	-0.1654	1.0000	0.3611
WD	0.2494	-0.2228	0.1347	0.1729	0.4344	0.3161	0.2556	-0.5154	0.3611	1.0000

2005	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.5164	0.5731	0.3646	0.6950	0.4400	-0.1503	-0.8365	0.1032	0.4777
CO	0.5164	1.0000	0.7013	-0.1248	0.4258	0.3664	-0.5444	-0.4505	0.0382	0.2151
NO ₂	0.5731	0.7013	1.0000	0.0088	0.4372	0.2256	-0.3345	-0.4250	0.1202	0.2015
O ₃	0.3646	-0.1248	0.0088	1.0000	0.5528	0.3044	0.6718	-0.4653	0.2689	0.4596
PM ₁₀	0.6950	0.4258	0.4372	0.5528	1.0000	0.5105	-0.0072	-0.5823	0.1526	0.5390
SO ₂	0.4400	0.3664	0.2256	0.3044	0.5105	1.0000	-0.0643	-0.4954	-0.1342	0.5221
T °C	-0.1503	-0.5444	-0.3345	0.6718	-0.0072	-0.0643	1.0000	-0.0926	0.3573	0.2754
RH	-0.8365	-0.4505	-0.4250	-0.4653	-0.5823	-0.4954	-0.0926	1.0000	-0.2202	0.5793
WS	0.1032	0.0382	0.1202	0.2689	0.1526	-0.1342	0.3573	-0.2202	1.0000	0.4091
WD	0.4777	0.2151	0.2015	0.4596	0.5390	0.5221	0.2754	-0.5793	0.4091	1.0000
2006	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.2703	0.3282	0.3670	0.5036	0.4642	0.0337	-0.8562	0.1081	0.3270
CO	0.2703	1.0000	0.6194	-0.1130	0.0926	0.3264	-0.2804	-0.1680	0.5372	0.1073
NO ₂	0.3282	0.6194	1.0000	-0.0224	0.3464	0.2182	-0.2989	-0.2374	0.2431	0.0976
O ₃	0.3670	-0.1130	-0.0224	1.0000	0.1744	0.0536	0.6857	-0.5477	0.1402	0.2918
PM ₁₀	0.5036	0.0926	0.3464	0.1744	1.0000	0.2431	-0.0347	-0.4891	0.0020	0.5329
SO ₂	0.4642	0.3264	0.2182	0.0536	0.2431	1.0000	-0.0380	-0.5484	0.0255	0.0263
T °C	0.0337	-0.2804	-0.2989	0.6857	-0.0347	-0.0380	1.0000	-0.2936	0.0406	0.1758
RH	-0.8562	-0.1680	-0.2374	-0.5477	-0.4891	-0.5484	-0.2936	1.0000	-0.0977	0.4403
WS	0.1081	0.5372	0.2431	0.1402	0.0020	0.0255	0.0406	-0.0977	1.0000	0.1049
WD	0.3270	0.1073	0.0976	0.2918	0.5329	0.0263	0.1758	-0.4403	0.1049	1.0000
2007	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.3369	0.2348	-0.0201	0.5857	0.6356	-0.2767	-0.8537	-0.0077	0.2736
CO	0.3369	1.0000	0.2509	-0.1348	0.2723	0.1092	0.0241	-0.1906	-0.1253	0.0222
NO ₂	0.2348	0.2509	1.0000	0.1869	0.2683	0.4713	-0.0310	-0.3759	0.2958	0.2530
O ₃	-0.0201	-0.1348	0.1869	1.0000	0.0632	0.1007	0.4873	-0.2658	0.2521	0.3806
PM ₁₀	0.5857	0.2723	0.2683	0.0632	1.0000	0.3975	-0.1600	-0.4717	0.2208	0.2282
SO ₂	0.6356	0.1092	0.4713	0.1007	0.3975	1.0000	-0.1193	-0.6795	0.2598	0.2833
T °C	-0.2767	0.0241	-0.0310	0.4873	-0.1600	-0.1193	1.0000	0.0348	0.2519	0.2139
RH	-0.8537	-0.1906	-0.3759	-0.2658	-0.4717	-0.6795	0.0348	1.0000	-0.1069	0.3682
WS	-0.0077	-0.1253	0.2958	0.2521	0.2208	0.2598	0.2519	-0.1069	1.0000	0.1707
WD	0.2736	0.0222	0.2530	0.3806	0.2282	0.2833	0.2139	-0.3682	0.1707	1.0000
2008	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WSP	WDR
IT	1.0000	0.5100	0.4802	0.1764	0.5843	0.5806	-0.2580	-0.7753	0.1016	0.3564
CO	0.5100	1.0000	0.5743	0.2005	0.4512	0.6606	-0.0655	-0.6631	0.0038	0.4497
NO ₂	0.4802	0.5743	1.0000	0.0258	0.4511	0.6162	-0.5094	-0.4733	-0.5014	0.1331
O ₃	0.1764	0.2005	0.0258	1.0000	0.2049	0.0687	0.6089	-0.4827	0.1008	0.4126
PM ₁₀	0.5843	0.4512	0.4511	0.2049	1.0000	0.6448	-0.2126	-0.5883	0.1170	0.2978
SO ₂	0.5806	0.6606	0.6162	0.0687	0.6448	1.0000	-0.2976	-0.6822	0.0481	0.3105
T °C	-0.2580	-0.0655	-0.5094	0.6089	-0.2126	-0.2976	1.0000	-0.0909	0.4138	0.2176
RH	-0.7753	-0.6631	-0.4733	-0.4827	-0.5883	-0.6822	-0.0909	1.0000	-0.2543	-0.5679
WS	0.1016	0.0038	-0.5014	0.1008	0.1170	0.0481	0.4138	-0.2543	1.0000	0.2047
WD	0.3564	0.4497	0.1331	0.4126	0.2978	0.3105	0.2176	-0.5679	0.2047	1.0000
2010	IT	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	T °C	RH	WS	WD
IT	1.0000	0.4200	0.3800	0.3400	0.5900	0.2700	-0.3100	-0.8100	-0.0300	0.2600
CO	0.4200	1.0000	0.5200	-0.0100	0.3800	0.2800	-0.5700	-0.1900	-0.3400	-0.1300
NO ₂	0.3800	0.5200	1.0000	0.1000	0.5300	0.2500	-0.2500	-0.3000	0.0600	0.2900
O ₃	0.3400	-0.0100	0.1000	1.0000	0.1100	0.0100	0.2600	-0.6100	0.1300	0.1500
PM ₁₀	0.5900	0.3800	0.5300	0.1100	1.0000	0.2100	-0.1800	-0.5600	0.1900	0.5300
SO ₂	0.2700	0.2800	0.2500	0.0100	0.2100	1.0000	-0.2100	-0.1500	0.0600	-0.1100
T °C	-0.3100	-0.5700	-0.2500	0.2600	-0.1800	-0.2100	1.0000	-0.0200	0.2700	0.2200
RH	-0.8100	-0.1900	-0.3000	-0.6100	-0.5600	-0.1500	-0.0200	1.0000	-0.1300	-0.5000
WS	-0.0300	-0.3400	0.0600	0.1300	0.1900	0.0600	0.2700	-0.1300	1.0000	0.3400
WD	0.2600	-0.1300	0.2900	0.1500	0.5300	-0.1100	0.2200	-0.5000	0.3400	1.0000

Correlaciones significativas a p < 0.05000

En síntesis, el crecimiento urbano, vehicular e industrial, además de la ausencia de planes de reducción de emisiones y generación de inventarios, son aspectos influyentes en el deterioro de la calidad del aire. La ineficiencia en la implementación de métodos de prevención y mitigación ante estos eventos, continúa alterando la calidad del aire y el bienestar de la población de la ZMG.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con el soporte de la Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, institución que proporcionó las bases de datos para su análisis. Por ello, se reconoce su participación y apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Barry RG, Chorley JR (1999) *Atmósfera, tiempo y clima*. 8ª Ed. Omega, Barcelona, 441 pp.
- [2] Cespedes R (2005) *Impacto de la contaminación atmosférica en la salud (ICAS)*. Proyecto Aire Limpio: Evaluación del efecto de la contaminación atmosférica en la salud de la población del Municipio Cercado Cochabamba – Bolivia. PP. 4-25.
- [3] COEPO (2010) Consejo Estatal de Población – Gobierno de Jalisco. Censo Estatal de población y vivienda 2010. Análisis de los resultados definitivos del Censo de Población y Vivienda 2010. Nota Técnica: 5/11. Guadalajara, Jalisco, 3 de marzo de 2011. <http://www.coepo.jalisco.gob.mx>. 8 pp.
- [4] Henry JG, Heinke GW (1999) *Ingeniería ambiental*. Pearson Educación - Prentice Hall. México. PP. 216-17.
- [5] INEGI (2010) Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. Censo de población y vivienda 2010. Comunicado número 063/11. 7 de marzo de 2011. Resultados definitivos. Datos de Jalisco. www.inegi.org.mx. 4 pp.
- [6] Martín JV (1991) *Fundamentos de climatología analítica*. Síntesis, Madrid. 100 pp.
- [7] Mihelcic J, Zimmerman J (2012) *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad, Diseño*. Alfaomega. México, PP. 530-31.
- [8] Molina LT, Molina MJ (2005) *La calidad del aire en la megaciudad de México. Un enfoque integral*. Fondo de Cultura Económica. México, 463 pp.
- [9] Molina Álvarez, María Teresa; Salvachúa Rodríguez, Joaquín; Calvo Aldea, Diadora, (2009). *Ciencias de la tierra y medioambientales*. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A. 432 páginas. ISBN: 8448169816. ISBN-13: 9788448169817. <http://www.mcgraw-hill.es>.
- [10] Nicod Chantal, Lizuka Michiko (2000) *Consultoras de la División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos*. Proyecto “Conciencia ciudadana y contaminación atmosférica en América Latina” con el auspicio del Gobierno de Japón. CEPAL-ONU. 35 pp.
- [11] PNUMA (1992) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Earth Summit. Agenda 21. The United Nations Programme of Action from Rio. Declaración Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Sección I. Dimensiones sociales y económicas. Cap. 6: Protección y fomento de la salud humana. <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21>. PP 6.1-6.46.
- [12] PNUMA (2011) *Seguimiento a nuestro medio ambiente en transformación: de Río a Río+20 (1992-2012)*. División de Evaluación y Alerta Temprana (DEWA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Nairobi. PP. 2-39, 53-55, 84-86.
- [13] PROAIRE 2011-2020 (2011). Programa para Mejorar la Calidad del Aire Jalisco 2011-2020. Inventario de emisiones. 231 pp. <http://www.semades.jalisco.gob.mx>.
- [14] Ramírez H, Andrade M, Bejaran R, García M, Wallo A, Pompa A, De la Torre O (2009) The spatial-temporal distribution of the atmospheric polluting agents during the period 2000–2005 in the Urban Area of Guadalajara, Jalisco, Mexico. *Journal of Hazardous Materials* 165 (1-3): 1128-1141.
- [15] Ramírez H, Andrade M, González M, Celis A. (2006). Contaminantes atmosféricos y su correlación con infecciones agudas de las vías respiratorias en niños de Guadalajara, Jalisco. *Salud Pública de México* 48

- (5): 385-394.
- [16] Ramírez H, Andrade M, De la Torre O, García M, Meulenert A García O, Alcalá J (2008) Evaluación de eventos climáticos extremos y su impacto en la salud en América Latina. Universidad de Guadalajara, México. 180 pp.
- [17] Segala C (1999) Health effects of urban outdoor air pollution in children. Current epidemiological data. *Pediatric Pulmonol.* 18: 6-8.
- [18] SEMARNAP/SS/GEJ (1997) Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca - Secretaría de Salud - Gobierno del Estado de Jalisco. Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001, 240 pp.
- [19] SENER (2010) Secretaría de energía. Gobierno Federal. <http://www.sener.gob.mx>.
- [20] SVT (2010) Secretaría de Vialidad y Transporte. Gobierno del Estado de Jalisco, México. <http://www.semades.jalisco.gob.mx>.
- [21] Turtós C. L. y Díaz R. N. (2005). Local Dispersion Modeling of the Atmospheric Contaminants in Complex Terrains. www.cubasolar.cu/Ecosolar/articulo05.htm. Cubaenergía.