

Monitoreo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Chihuahua (Norte de México) como una herramienta para la gestión de la calidad del aire

A. Campos*, R. Gómez, L. Licon, J. Carrillo, E. Ramírez y E.F. Herrera

Departamento de Medio Ambiente y Energía, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV).
Av. Miguel de Cervantes \#120, Complejo Industrial Chihuahua, 31109 Chihuahua, México

Recibido 23 Junio 2008, Revisado 7 Octubre 2008, Aceptado 8 Octubre 2008

Monitoring air pollutants in Chihuahua City (Northern Mexico) as a tool for air quality management

Abstract

Comparison of the air pollutant measurements with health standards (NOM) helps to design air quality control programs. In this study we developed a pseudo-real time monitoring system in which the concentration data from particulate matter smaller than 10 μm (PM_{10}), ozone (O_3) carbon monoxide (CO) and sulfur dioxide (SO_2) were analyzed (data obtained during 2007). The monitoring site was located in the northern area of Chihuahua City. The databases contain the event identification, date/time, pollutant concentration, and an error code. The website allows visualizing the real-time pollution levels and generates reports and graphs of specified time periods. The system has an intranet section which generates statistical reports in XLS format. The system also has the capability to manage information of additional stations. Air quality was determined according to health standards (NOM), and an air quality index already used in Mexico (IMECA). Among the pollutants monitored, only PM_{10} showed values above 100 IMECA points. According to the applicable standard, levels of PM_{10} barely met the established limits for both 24 hours averages (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) with 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, as well as the annual average (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) with 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ozone was the second largest pollutant, as their concentrations were also close to the limit set by the applicable standard to the maximum daily 8-hour mobile average (0.080 ppm) with 0.076 ppm. Concentrations of CO and SO_2 are far below the standards limits, so the air quality for this pollutant was considered adequate. Furthermore, it was observed characteristic behavior of the pollutants along the day and during the year.

Keywords: Air quality standards, real-time air quality monitoring, suspended particulate matter < 10 μm , O_3 , CO, SO_2 .

Resumen

El monitoreo de los contaminantes atmosféricos en relación con las normas de salud es básico para establecer programas de control de la calidad del aire. En este estudio se desarrolló un sistema de monitoreo en tiempo casi real y se analizaron datos de niveles de concentración de partículas suspendidas menores a 10 μm (PM_{10}), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2), en una estación ubicada en la zona norte de la Cd. de Chihuahua durante el año 2007. Las bases de datos generadas contienen el código de identificación del evento, fecha/hora, contaminante y su concentración, y un código de error. Se construyó una página de internet que permite visualizar en tiempo real los niveles de contaminación y generar reportes y gráficos en periodos de tiempo especificados. El sistema cuenta con una sección de intranet para obtener datos estadísticos en formato xls, y además tiene capacidad de administrar información de estaciones adicionales. Se determinó la calidad del aire de acuerdo a los límites establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), y al Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) utilizado en México. De los 4 contaminantes, sólo las PM_{10} presentaron valores de más de 100 puntos IMECA. De acuerdo a la NOM aplicable, los niveles de PM_{10} estuvieron apenas dentro de los límites establecidos, tanto para los promedios de 24 horas (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) con 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, así como para el promedio anual (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) con 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El O_3 fue el segundo contaminante en importancia, ya que sus concentraciones también se encuentran muy cerca de límite establecido para los promedios máximos diarios móviles de 8 horas (0.080 ppm) con 0.076 ppm. Las concentraciones de CO y SO_2 se encuentran muy por debajo de los límites establecidos en las NOM por lo que la calidad del aire en cuanto a estos contaminantes se considera buena. También se observaron comportamientos característicos de los contaminantes durante las horas de día y durante el año.

Palabras clave: Índice de calidad del aire, sistemas de monitoreo a tiempo real, partículas suspendidas < 10 μm , O_3 , CO, SO_2 .

* Autor para correspondencia

E-mail: alfredo.campos@cimav.edu.mx, Tel: +52-614-4391110, Fax: +52-614-4391170.

Introducción

La contaminación del aire urbano es una seria amenaza a la salud humana y el ambiente, tanto en países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo. La rápida urbanización ha resultado en un incremento de las emisiones contaminantes al aire debido al transporte, producción de energía y actividad industrial concentrada en áreas densamente pobladas. Este tema está recibiendo una creciente atención, ya que una proporción cada vez mayor de la población mundial vive en centros urbanos y demanda un ambiente más limpio. (García y Fernández, 1999; Kim et al., 2005; Gurjar et al., 2008).

La formulación de programas de gestión de la calidad del aire, requiere entre otras cosas, de evaluar los contaminantes a través de un monitoreo atmosférico, el cual consiste en medir, analizar y procesar continuamente las concentraciones de contaminantes en un lugar y tiempo determinados. Este monitoreo es una función cada vez más importante de las agencias ambientales; sin embargo puede tener altos costos de inversión y operación, además de requerimientos significativos de infraestructura para asegurar la calidad de los datos (Young y Vazquez, 2001).

La mayoría de los estudios involucran el monitoreo de contaminantes criterio: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), y partículas suspendidas (PM) totales en tamaños específicos. Se les llama contaminantes criterio porque han sido objeto de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire (Mahadevan et al., 1999; CEPIS, 2005).

Por experiencia de pasados episodios de contaminación severa, muchos países han establecido normas y reglamentos para controlar la calidad del aire, esto es, limitar la concentración en la atmósfera de contaminantes a niveles en los cuales no se observen efectos adversos a la salud humana. Al comparar las mediciones con las normas establecidas, se puede determinar si la calidad del aire es satisfactoria, y en caso contrario, establecer programas de control acordes con la severidad del problema (Henry y Heinke, 1999; INE, 2000).

Gran parte de los trabajos sobre contaminación atmosférica publicados a nivel internacional, se han desarrollado en áreas metropolitanas densamente pobladas ("megaciudades"), con altos niveles de contaminación y frecuentes excedencias a los estándares de calidad del aire aplicables. Además las megaciudades de Europa y los Estados Unidos difieren en muchos sentidos de aquellas estudiadas en Latinoamérica y Asia (Aneja et al., 2001; Raga et al., 2001; Kim et al., 2005 y Wang y Zu, 2006). En México, los trabajos reportados se enfocan principalmente en la Zona Metropolitana de Valle de México y la zona fronteriza México/Estados Unidos, siendo escasos en el resto del país (Aldape et al., 1999; Baumgardner et al., 2006). A pesar de que en el país existen al menos 23 ciudades que cuentan con redes de monitoreo atmosférico (SINAICA, 2008), los datos sólo son reportados a través de la Internet y en informes de las autoridades ambientales (INE, 1998 y 2000).

En la ciudad de Chihuahua, no existía un monitoreo de la calidad del aire sistemático y de larga duración, por lo cual, para el presente estudio se conjuntaron esfuerzos y recursos entre una institución académica (CIMAV) y las autoridades ambientales locales (Gobierno Municipal de Chihuahua), con el objetivo de generar bases de datos de contaminación atmosférica, comparar las concentraciones con las normas de calidad del aire aplicables y estudiar sus tendencias. Estos resultados pueden ser utilizados por las autoridades ambientales en la elaboración de Políticas Ambientales, Programas de Gestión de la Calidad del Aire y Sistemas de Información hacia la población.

Material y métodos

Área de Estudio

La ciudad de Chihuahua se ubica en el centro del Estado de Chihuahua, en los 28°39' de latitud norte y los 106° 05' de longitud oeste. El valle donde se asienta la ciudad se encuentra rodeado de tres sierras: la Sierra de la Haciendita, al oeste de la ciudad; la Sierra de Nombre de Dios, al este y la Sierra Pastorías, al sur. El clima prevaleciente en la zona es de tipo seco estepario con régimen de lluvias en verano, con una precipitación promedio

anual de 385 mm, una temperatura media anual de 18.0° C y una humedad relativa promedio anual de 50%. (INEGI, 1995; CONAGUA, 2008). Se presenta una época seca de 7 a 9 meses y período libre de heladas de 210 a 250 días. Por sus características climatológicas, se considera que la zona es de clima extremo. Según la clasificación climática de Köppen, modificada por E. García para las condiciones particulares de la República Mexicana, le corresponde Bso w(w) h(e), donde Bso se refiere a un clima seco o estepario muy seco; w(w) a un régimen de lluvias en verano; h, semicálido con invierno fresco, temperatura media anual entre 18 y 22 °C; (e) clima muy extremo, y una oscilación anual de las temperaturas medias mensuales mayor de 14 °C (COTECOCA, 1978). La ciudad tiene una población aproximada de 760,000 habitantes (INEGI, 2005). Los usos de suelo dominantes dentro de la ciudad son el industrial, residencial, comercial y de servicios. Se tienen cinco tipos de uso residencial, diferenciados por densidad, los cuales van desde 50 a 200 personas por hectárea.

Estación de monitoreo

La estación de monitoreo se ubicó en la instalaciones del Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV), al norte de la ciudad, con la toma de muestra a una altura de 4 m sobre el nivel del suelo. El sitio se encuentra en un Parque Industrial, clasificado como industria ligera ("maquiladoras"). Este Parque se encuentra rodeado de zonas habitacionales con una densidad de 26 a 60 viviendas por hectárea. En la elección del sitio se consideraron los criterios establecidos en los Manuales de Aseguramiento de la de la Calidad de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1994 y 1998), además de los resultados de un estudio realizado previamente, el cual mostró concentraciones de contaminantes gaseosos más elevadas hacia el norte de la ciudad (Campos, et al., 2005). Las fuentes potenciales de contaminación más próximas son la Avenida Tecnológico (carretera Panamericana) a 0.4 km y un complejo de plantas dedicadas a la fabricación de loseta cerámica (3 km).

El monitoreo de partículas PM₁₀ se realizó por atenuación de rayos beta (MetOne, BAM 1020), el

SO₂ por fluorescencia UV (API, 100A), el CO por absorción de radiación infrarroja no dispersiva, con correlación de filtro de gas (API, 300A), y el O₃ por fotometría UV (TEI, 49C). La estación de monitoreo, además, esta equipada con un calibrador de gases de flujo másico con generador de ozono y cámara de titulación de fase gaseosa (API, 700), y un generador de aire limpio (API, 701).

Para la operación de la estación se desarrolló un Sistema de Gestión de la Calidad de los Datos, el cual se basó en los manuales EPA previamente mencionados y las Normas Oficiales Mexicanas para la determinación de la concentración de los contaminantes (SEMARNAT, 1993). Se elaboraron procedimientos de operación, verificación y calibración para cada uno de los equipos, en los cuales se incluyeron criterios de aceptación y rechazo de las mismas. Este sistema también incluyó un calendario para la realización de verificaciones, calibraciones y mantenimientos preventivos de los equipos, así como bitácoras y formatos para el registro de estas actividades.

De acuerdo al programa establecido, las calibraciones de los equipos se realizaron periódicamente basadas en las NOM correspondientes (SEMARNAT, 1993) y los manuales del fabricante. La calibración consistió en ajustar la ganancia y el corrimiento de los equipos contra estándares conocidos. Para generar estos estándares mediante el calibrador, se utilizó un gas patrón (Praxair, protocolo EPA, concentración de NO: 51.0 μ/mol/mol, CO: 4947.8 μ/mol/mol, SO₂: 51.1 μ/mol/mol, balance nitrógeno). Para la calibración de los analizadores, se introdujo una mezcla con una concentración del 80% de la escala total y se ajustó el equipo a esa concentración. También se introdujo aire cero al analizador para obtener la curva de calibración. La linealidad del equipo se verificó con tres puntos intermedios entre los puntos usados previamente.

Sistema de Información (SMCA 1.0)

Se desarrolló un sistema de monitoreo en tiempo casi real de los 4 contaminantes. Con un servidor (Dell, Poweredge 9G 1950) y una computadora personal (PC) se construyó un pequeño "cluster". A la PC se le instaló una tarjeta multipuertos RS232 para comunicarse con los equipos de monitoreo y

Tabla 1. Estadística descriptiva de los promedios de las concentraciones horarias y diarias de PM₁₀, O₃, CO y SO₂ en el sitio CIMAV durante el monitoreo de 2007. (DE: desviación estándar).

	Datos		Media ± DE	Rango	Percentil		Percentil 75
	N	perdidos			25	Mediana	
Promedios horarios:							
Partículas PM ₁₀ (µg/m ³)	7261	1499	48.00 ±46.88	1.00-420.00	18.00	33.00	60.00
O ₃ (ppb)	8288	472	29.94 ±18.16	0.01-87.46	12.67	29.35	44.00
CO (ppm)	8181	579	1.57 ±1.27	0.01-10.52	0.55	1.22	2.31
SO ₂ (ppb)	7500	1260	6.12 ±3.71	0.01-14.99	2.97	6.07	8.29
Promedios diarios:							
Partículas PM ₁₀ (µg/m ³)	320	45	47.42 ±27.98	5.88-157.90	26.18	40.98	62.97
O ₃ (ppb)	351	14	29.69 ±10.14	0.01-57.01	22.17	29.68	37.63
CO (ppm)	351	14	1.55 ±1.08	0.01-6.43	0.65	1.40	2.35
SO ₂ (ppb)	345	20	6.35 ±3.76	0.01-14.87	3.26	6.40	9.58

funcionó como almacenador de datos (logger). Las bases de datos contienen el código de identificación del evento, la fecha/hora del evento, el tipo de contaminante, la concentración del contaminante, y un código de error. Para informar a la población sobre la calidad del aire, se creó una página web (<http://smca/cimav.edu.mx>), la cual permite a los visitantes visualizar en tiempo casi real los niveles de contaminación, y además puede generar reportes y gráficos en los periodos de tiempo deseados (hora, días, meses, años). Adicionalmente, el sistema cuenta con una sección de intranet, la cual permite obtener datos estadísticos con opciones muy específicas en formato xls. Este sistema tiene la capacidad de administrar la información de estaciones de monitoreo adicionales que se ubiquen en diversos puntos de la ciudad. El desarrollo del SMCA 1.0, combinó herramientas de redes, seguridad en redes, sistemas distribuidos, programación de bajo y alto nivel, programación de intranet y sitios web.

Índice de Calidad del Aire (ICA)

Con la finalidad de establecer el nivel de cumplimiento del sitio CIMAV, se calcularon los promedios de las concentraciones de los contaminantes estudiados de acuerdo a lo establecido en las NOM en materia de Salud (SS, 1994, 2002 y 2005). Para el reporte de calidad del aire se utilizó el índice IMECA (GODF, 2006).

Análisis estadístico

Los datos de contaminantes monitoreados durante el año 2007 fueron analizados por medio de estadísticas descriptivas y gráficos de cajas y bigotes, utilizando el programa Minitab 15.

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran los parámetros estadísticos descriptivos para los promedios horarios y diarios de las concentraciones de PM₁₀, O₃, CO y SO₂. En general, estos datos muestran desviaciones estándar relativamente grandes respecto a las medias, debido a que las concentraciones tuvieron grandes variaciones entre las diferentes horas y días, tal como lo muestran los rangos entre los mínimos y máximos.

Nivel de cumplimiento con la normatividad para la calidad del aire

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) estableció los Estándares Nacionales para la Calidad del Aire Ambiente (NAAQS) para los contaminantes criterio como una medida para la protección a salud humana y el ambiente (USEPA, 2008). La Comunidad Europea también ha publicado sus propias Directivas, las cuales en algunos casos son más restrictivas que las NAAQS (García y Fernández, 1999). Países como India y

Tabla 2. Niveles de concentración de 4 contaminantes criterio en el sitio CIMAV durante el 2007.

Contaminante	Concentración	Tiempo Promedio	Limite Máximo
Partículas PM ₁₀	117 µg/m ³	24 h	120 µg/m ³ (percentil 98)†
	47 µg/m ³	Promedio aritmético anual	50 µg/m ³ †
O ₃	0.087 ppm	1 h	0.11 ppm (una vez al año) ¹
	0.076 ppm	Promedio móvil de 8 h	0.08 ppm (quinto máximo al año) ¹
CO	6.4 ppm	Promedio móvil de 8 h	11 ppm (una vez al año) ²
	0.014 ppm	24 h	0.13 ppm (una vez al año) ³
SO ₂	0.006 ppm	Promedio aritmético anual	0.03 ppm ³

†: NOM-025-SSA1-1993 (PM₁₀)¹: NOM-020-SSA1-1993 (O₃)²: NOM-021-SSA1-1993 (CO)³: NOM-022-SSA1-1993 (SO₂)

Korea, han adoptado normas de calidad del aire basados en estos estándares (Aneja et al., 2001; Kim et al., 2005). En México, desde el año 1994, el gobierno federal estableció sus propias normas (basadas también en estándares internacionales). Los resultados del monitoreo de cada contaminante fueron comparados con esta normatividad (Tabla 2).

Partículas PM₁₀: De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, la cual establece que un sitio cumple con la norma de PM₁₀ para el promedio de 24 horas cuando el valor del percentil 98, es menor o igual a 120 µg/m³, el sitio apenas cumplió con esta normatividad en el periodo 2007, ya que el percentil 98 calculado fue de 117 µg/m³, muy cercano al límite establecido.

De igual manera, la citada norma establece que un sitio cumple con la norma cuando el promedio anual de los valores diarios es menor o igual a 50 µg/m³. También en este caso el sitio estuvo muy cercano al límite, presentando un promedio anual de 47 µg/m³.

Estos datos concuerdan con estudios previos (Campos et al., 2005; Parra, 2005; Campos, 2006) en que son las partículas suspendidas el contaminante de mayor preocupación en la ciudad de Chihuahua.

Ozono: Para este contaminante, la NOM-020-SSA1-1993 establece que un sitio cumplirá cuando cada uno de los valores horarios sea menor o igual a 0.110 ppm. Ninguno de los promedios horarios rebaso durante el año el límite establecido, siendo 0.087 ppm el mayor valor registrado, por lo que se considera al sitio dentro de norma. En cuanto a la determinación del cumplimiento del límite de 0.080

ppm de O₃, la norma indica que en cada sitio de monitoreo se tomarán únicamente los promedios móviles de 8 horas máximos diarios y un sitio cumplirá cuando cuente con más de 75% de los datos válidos y el valor del quinto máximo del año sea menor o igual a 0.080 ppm. En este caso, el sitio también cumplió con la norma, ya que el valor máximo fue de 0.076 ppm.

Monóxido de carbono: La NOM-021-SSA1-1993, establece que la concentración de CO no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm en promedio móvil de ocho horas una vez al año. El límite máximo no fue rebasado durante el año, siendo el máximo registrado de 6.4 ppm, por lo que tampoco hubo incumplimiento a la mencionada Norma.

Dióxido de azufre. En cuanto al SO₂, la NOM-022-SSA1-1993 indica que su concentración no debe rebasar el límite máximo de 0.13 ppm, en 24 horas una vez al año y 0.03 ppm en una media aritmética anual. La media aritmética para este sitio fue de 0.006 ppm y la concentración máxima de 0.014 ppm, lo que coloca a este sitio dentro de norma muy por debajo de los límites establecidos.

Índice de Calidad del Aire

Un Índice de Calidad del Aire (ICA) es un valor de referencia para que la población conozca de manera sencilla los niveles de contaminación prevalecientes en su zona de residencia y resulta de la conversión de los datos de contaminantes mediante diferentes sistemas de ponderación (Wang y Lu, 2006; Chu et al., 2008). Una forma de obtener este índice es mediante una función lineal segmentada donde los puntos de inflexión son los estándares de calidad del aire, y a partir de esta

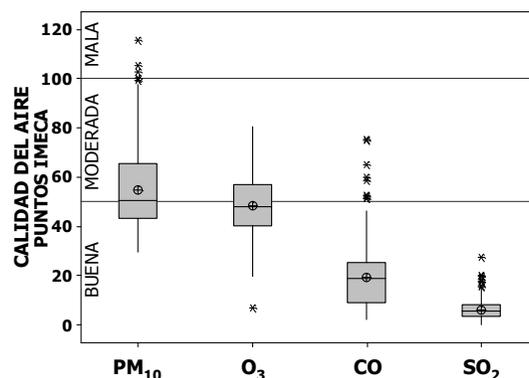


Figura 1. Gráfico de cajas de los valores IMECA máximos diarios de PM₁₀, O₃, CO y SO₂ en el sitio CIMAV durante el 2007.

función se le atribuye a cada contaminante un número adimensional referido a una escala (Landulfo et al., 2007). En México existe el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Cuando el IMECA de cualquier contaminante rebasa los 100 puntos, significa que sus niveles son perjudiciales para salud y en la medida en que aumenta este valor se agudizan los síntomas (GODF, 2006).

Internet es comúnmente utilizada para informar al público del estado de la calidad del aire ambiente y a través de un ICA. (Van del Elshout et al., 2008). En este proyecto se creó una página en Internet para informar al público en tiempo casi real sobre la calidad del aire en el sitio de monitoreo, utilizando el IMECA para facilitar la comprensión y homologar el sistema de información con otros existentes en el país.

Partículas PM₁₀: Durante el periodo del estudio, los niveles de este contaminante se mantuvieron por debajo de los 50 puntos IMECA durante el 50% de los días, lo que representa una Buena calidad de aire (Fig. 1). El resto de los días, los valores estuvieron en el rango de Moderada (51-100 puntos IMECA), presentándose 6 días con valores de 100 o más puntos (28 de enero: 103, 29 de enero: 100, 30 de enero: 116, 23 de febrero: 105, y 24 de febrero: 100).

Ozono: Los valores de O₃ también se mantuvieron dentro de una Buena calidad del aire durante la mitad de los días del año 2007 (Fig. 1). El resto del

tiempo la calidad del aire fue Moderada, siendo el máximo valor 81 puntos, por lo que no se llegaron a presentar episodios de Mala calidad del aire.

Monóxido de carbono: En cuanto al CO, sus niveles máximos se mantuvieron por debajo de los 25 puntos IMECA durante la mayor parte de los días del año (Fig. 1), lo que significa una Buena calidad con respecto este contaminante. Durante el año sólo se presentaron algunos valores de calidad Moderada, con un valor máximo de 75 puntos IMECA.

Dióxido de azufre: La calidad del aire en cuanto a SO₂ fue Buena, presentando niveles muy bajos, con un valor máximo de 28 puntos IMECA (Fig. 1).

Análisis temporal de las concentraciones de PM₁₀, O₃, CO y SO₂

Por ser la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) un referente, respecto a contaminación atmosférica tanto a nivel nacional como internacional, se compararon los comportamientos observados con un estudio realizado en esta zona con datos de 1986 a 1999 de dos estaciones de monitoreo (Raga et al., 2001), además de otro trabajo desarrollado previamente en la ciudad de Chihuahua (Parra, 2005), donde se analizaron los datos de ocho campañas cortas (de 2 a 8 meses) realizadas entre agosto del 2001 y mayo del 2004 para observar el comportamiento horario de los contaminantes.

Partículas PM₁₀: El análisis mostró que las mayores

concentraciones de PM_{10} se presentaron en la temporada fría (enero-marzo y octubre-diciembre); sin embargo, también se observó una mayor dispersión de los datos en estos meses (Fig. 2).

En cuanto al comportamiento horario, este contaminante presentó dos máximos (picos) muy definidos durante el día (Fig. 3). El primer incremento se presenta durante las primeras horas de la mañana, iniciando a las 7:00 y alcanzando su máximo a las 9:00 (media= 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); estabilizándose entre las 13:00 y las 19:00 (media= entre 30 y 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Al iniciar la noche se observa un segundo pico, aunque menos abrupto y sin alcanzar los niveles matutinos, llegando a su máximo a la 1:00 (media= 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y descendiendo paulatinamente hasta las 6:00 (media= 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se encontró que los resultados del comportamiento mensual coinciden con lo reportado por Raga et al. (2001) para la ZMVM (considerando sólo la tendencia y no los niveles de concentración) donde las concentraciones máximas se presentaron de diciembre a marzo. De acuerdo a Parra (2005), el comportamiento bimodal observado durante el día

es característico en la ciudad de Chihuahua. En la ZMVM se presentan varios picos durante el día; sin embargo, los valores máximos también se alcanzan durante las horas previas al mediodía y a la medianoche, desfasándose ligeramente con respecto a Chihuahua.

Ozono: Los meses cálidos del año (abril-agosto) presentaron concentraciones más elevadas, mientras que las más bajas se observaron durante la temporada fría de noviembre, diciembre y enero (Fig. 2). El comportamiento horario de este contaminante mostró la típica forma de campana, la cual se forma durante las horas soleadas del día (Fig. 3). Las concentraciones máximas se presentaron entre las 11:00 y las 15:00 horas, con medias entre 46 y 49 ppb. La concentración mínima en el día se observó a las 6:00 horas con una media de 13 ppb.

También, en la ZMCM se observó la mayor concentración en el mes de abril; sin embargo, esta tendencia no se mantiene durante los meses de verano, sino que cae abruptamente, tal vez coincidiendo con la temporada lluviosa, que en el caso de Chihuahua es más corta y de menor

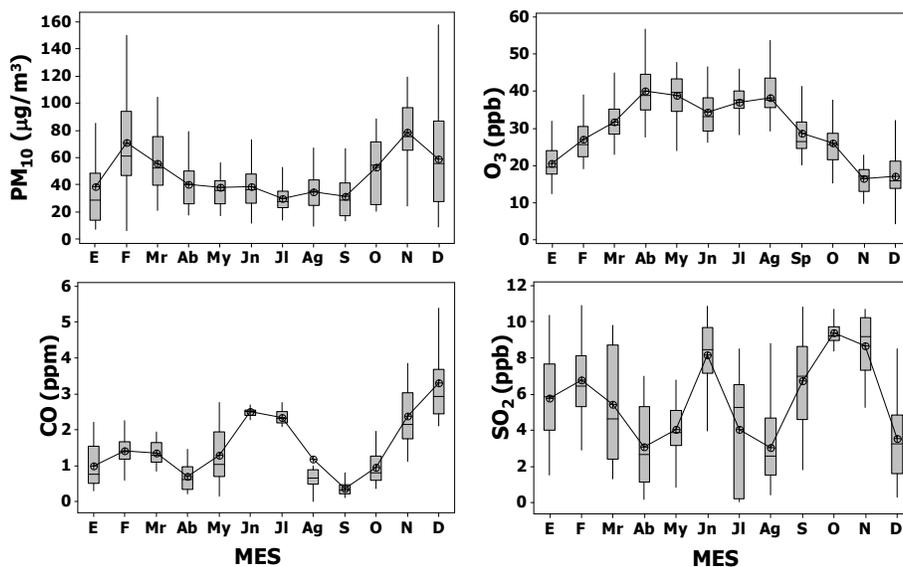


Figura 2. Gráficos de cajas y bigotes de las concentraciones de PM_{10} , O_3 , CO y SO_2 en el sitio CIMAV por mes durante el 2007 (promedios 24 h).

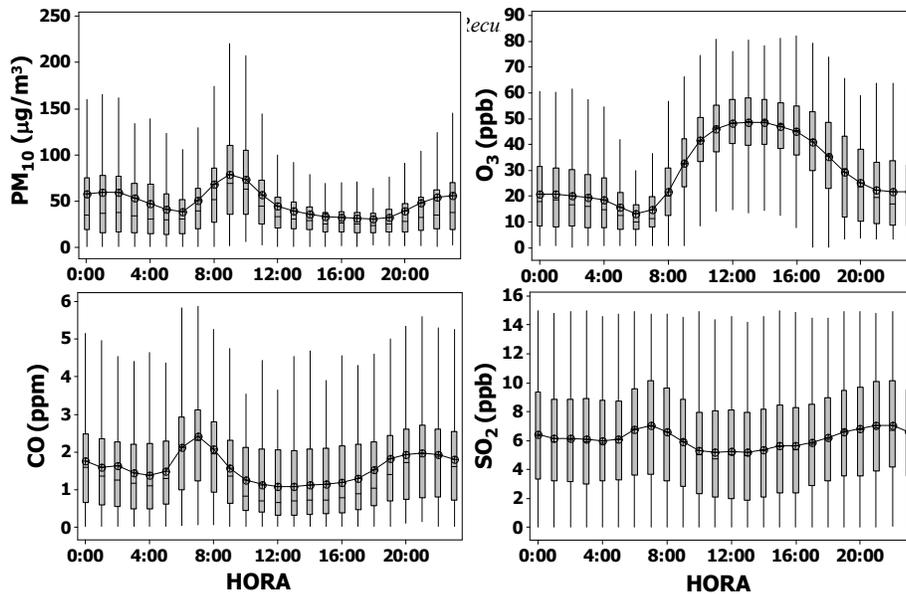


Figura 3. Gráficos de cajas y bigotes de las concentraciones de PM_{10} , O_3 , CO y SO_2 en el sitio CIMAV por hora del día durante el 2007 (promedios 1h).

intensidad. El comportamiento horario resultó muy similar al reportado previamente para la ciudad (Parra, 2005), con un incremento en las concentraciones a partir del amanecer. En la ZMCM este incremento inicia un poco más tarde (alrededor de la 10:00 horas).

Monóxido de carbono: Las concentraciones de este contaminante no mostraron una tendencia muy definida durante el año, pero se observaron concentraciones ligeramente mayores durante los meses de noviembre y diciembre (Fig. 2). El comportamiento de este contaminante mostró gran coincidencia con los resultados de Parra (2005), a diferencia de la ZMCM (Raga et al., 2001), la cual muestra un incremento muy definido en sus concentraciones durante la temporada invernal.

La tendencia de los promedios horarios fue muy similar al mostrado por las PM_{10} (Fig. 3), con un incremento matutino de las 5:00 a las 8:00 horas, cuando alcanza el máximo diario (media= 2.4 ppm); luego un descenso hasta las 12:00 horas, permaneciendo durante el resto de la tarde en concentraciones medias de entre 1.13 y 1.29 ppm. Hacia las 19:00 horas se observó un incremento gradual hasta las 21:00 horas (media 1.96 ppm). En la ZMCM también se observan dos picos (mañana y noche), pero ambos son mucho más pronunciados que los observados en Chihuahua.

Dióxido de azufre: Al igual que en la ZMVM, en este caso tampoco se observó una tendencia estacional definida de las concentraciones (Fig. 2), presentándose valores altos tanto en meses cálidos (junio) como en meses fríos (noviembre); y de igual manera con valores bajos registrados en abril y diciembre.

Las concentraciones por hora, también mostraron incrementos durante las primeras horas de la mañana y de la noche, aunque estos incrementos fueron menores, y por lo tanto, con picos menos pronunciados que el resto de los contaminantes estudiados. Las concentraciones máximas se observaron a las 7:00 y a las 21:00 horas con promedios de 7.03 y 7.07 ppb respectivamente (Fig. 3).

Al respecto, hubo mayor coincidencia entre lo reportado por Parra (2005) y Raga, et al. (2001) ya que ambos estudios mostraron varios picos durante el día, con pendientes más pronunciadas que las observadas en el presente estudio.

Conclusiones

Aun cuando las partículas PM_{10} se encuentran dentro los límites establecidos por la normas de salud, sus concentraciones se encuentran muy cerca de superar esos niveles, por lo que se considera que

la calidad del aire en cuanto a este contaminante, no es satisfactoria, resultando este contaminante el de mayor preocupación. El ozono es el segundo contaminante en orden de importancia, ya que sus concentraciones también se encuentran cercanas a los límites establecidos, siendo el verano el período más crítico.

Las tendencias horarias de los contaminantes mostraron mucha similitud con estudios anteriores realizados en la zona de estudio, pero tienen diferencias con las observadas en la ZMVM, lo que revela que cada ciudad tiene su propio comportamiento, probablemente debido a los hábitos de la población, la dinámica industrial y las condiciones meteorológicas.

Bibliografía

- Aldape, F., Flores, J., Díaz, M., R. V., Hernández, B., Montoya, J.M., Z., Blanco, E.E., Fuentes, A.F. y Torres, L.M., 1999. PIXE analysis of airborne particulate matter from Monterrey, México. A first survey. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 150: 439-444
- Aneja, V.P., Agarwal, A., Reolle, P.A., Phillips, S.B., Tong, Q., Watkins, N. y Yablonsky, R., 2001. Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi, India. *Environment International*, 27:35-42.
- Baumgardner, D., Raga, G.B., Grutter, M., Lammel, G. y Moya, M., 2006. Evolution of anthropogenic aerosols in the coastal town of Salina Cruz, Mexico: Part II particulate phase chemistry. *Science of Total Environment*, 372: 287-298.
- Campos, A., Manzanares, L.I., Keer, A., Ramírez, E., Ramos, V.H., y Carrillo, J., 2005. Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Chihuahua en base a la concentración de contaminantes a nivel de piso. Informe Final preparado para la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Gobierno del Estado del Chihuahua. México.
- Campos, A., 2006. Evaluación de partículas atmosféricas PST y PM₁₀ en la ciudad de Chihuahua, México. Niveles de concentración, composición elemental e identificación de fuentes emisoras. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Chihuahua. México.
- CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2005. Conceptos básicos de la meteorología de la contaminación del aire. Orientación para el control de la contaminación del aire (en: www.cepis.ops.oms.org/bvsci/e/fulltext/meteoro/frame.html)
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2008. Normales climatológicas. Chihuahua, Chihuahua. Periodo 1980-2000 (en: <http://smn.cna.gob.mx/productos/observatorios/historica/chihuahua.pdf>)
- COTECOCA. Comisión Técnico Consultiva de Coeficiente de Agostadero, 1978. Estudio para el Estado de Chihuahua. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Chu, P.C., Chen, Y., Lu, S., Li, Z. y Lu, Y., 2008. Particulate air pollution in Lanzhou China. *Environmental International*, doi:10.1016/j.envint.2007.12.013. Artículo en prensa.
- García, J.F. y Fernández, R., 1999. The environmental control of atmospheric pollution. The Framework directive and its development. The new European approach. *Sensors and Actuators B*, 59: 69-74.
- GODF. Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio, como son: O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5}. Publicada el 29 de noviembre del 2006.
- Gurjar, B.R., Butlen, T.M., Lawrence, M.G., y Levieles, J., 2008. Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42:1593-1606.
- INE. Instituto Nacional de Ecología, 1999. Tercer Informe sobre la Calidad del Aire en las Ciudades Mexicanas 1998. Ed. Dirección General de Gestión e Información Ambiental. México, D.F.
- INE. Instituto Nacional de Ecología, 2000. Gestión de la Calidad del Aire en México. Logros y Retos para el Desarrollo Sustentable 1995-2000. Ed. Dirección Ejecutiva de Participación Social, Enlace y Comunicación. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1995. Anuario Estadístico del Estado de Chihuahua.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2005. Segundo Censo de Población y Vivienda 2005 (en <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005>).
- Kim, K.H., Choi, Y.J. y Kim, M.Y., 2005. The exceedance patterns of fair quality criteria: a case of study of ozone and nitrogen dioxide in Seoul, Korea between 1990 and 2000. *Chemosphere*, 60: 441-452.
- Landulfo, E., Matos, C.A., Torres, A.S., Sawamura, P. y Uehara, S.T., 2008. Air quality assessment using a multi-instrument approach and air quality indexing in an urban area. *Atmospheric Research*, 85: 98-111.
- Mahadevan, T.N., Kulkarni, P.B. y Nambi, K.S.V., 1999. Development of continuous air quality monitoring systems at Bhabha Atomic Research Center for the conventional pollutants and their performance evaluation. *Sensors and Actuators B*, 55: 111-117.
- Parra, J. 2005. Tendencias diarias de los contaminantes criterio (CO, NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀) en la Ciudad de Chihuahua. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Durango. México.
- Raga, G.B., Baumgardner, D., Castro, T., Martínez, A. y Navarro, R., 2001. Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmospheric Environment*, 35: 4041-4058.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1993. NOM- 34-ECOL-1993, NOM- 36-ECOL-1993 y NOM-038-ECOL-1993, Que establecen los métodos de medición para determinar la concentración en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición de monóxido de carbono, ozono y bióxido de azufre, respectivamente.
- SINAICA. Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire, 2008. Avance en la integración de redes de monitoreo al SINAICA (en: <http://sinaica.ine.gob.mx>).

- SS (Secretaría de Salud), 1994. Normas Oficiales Mexicanas NOM-021-SSA1-1993 y NOM-022-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO) y bióxido de azufre (SO₂). Valores permisibles para la concentración de monóxido de carbono (CO) y bióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
- SS (Secretaría de Salud), 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire.
- SS (Secretaría de Salud), 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM_{2.5} de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.
- USEPA. Environmental Protection Agency, 1994. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurements Systems. Volume I: A Field Guide to Environmental Quality Assurance. EPA/600/R94/038a.
- USEPA. Environmental Protection Agency, 1998. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurements Systems. Volume II: Part 1 Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development. EPA-454/R-98-004.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency, 2008. National Ambient Air Quality Standards (en: <http://epa.gov/air/criteria.html>).
- Van den Elshot, S., Léger, K. y Nussio, F., 2008. Comparing urban air quality in Europe in real time. A review of existing air quality indices and the proposal of a common alternative. *Environment International*, 34:720-726.
- Wang, X.K., y Lu, W.Z., 2006. Seasonal variation of fair pollution index: Hong Kong case study. *Chemosphere*, 63: 1261-1272.
- Young, J.W.S., y Vazquez, A., 2001. Practical air quality management. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28: 170-182.