

## Mediciones continuas de carbono negro, monóxido de carbono y dióxido de carbono, durante la temporada seca caliente 2016, en un sitio periurbano de Querétaro, México

Continuous measurements of black carbon, carbon monoxide and carbon dioxide during dry warm-season 2016 in a peri-urban area of Queretaro, Mexico

<sup>1,2,\*</sup> Rafael Liñán Abanto

<sup>1</sup> Telma Castro

<sup>1</sup> Oscar Peralta

<sup>1</sup> Luis G. Ruiz Suárez

<sup>3</sup> Dara Salcedo

<sup>4</sup> Giovanni Carabali

<sup>5</sup> Patrick Arnott

<sup>5</sup> Guadalupe Paredes Miranda

### RESUMEN

En Juriquilla-Querétaro, se midió la concentración en masa de carbono negro (BC), la relación de mezcla de monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las mediciones se realizaron del 01 de marzo al 30 de abril de 2016. En abril, los valores medios del BC (1.23 µg/m<sup>3</sup>) y CO (0.30 ppm) fueron mayores a sus correspondientes del mes de marzo (1.08 µg/m<sup>3</sup> y 0.26 ppm, respetivamente). El CO<sub>2</sub> no sufrió variación en estos meses y mantuvo un valor casi constante de alrededor de 406 ppm. Las tendencias diarias del BC, CO y CO<sub>2</sub> fueron similares, con un máximo pronunciado por la mañana y un mínimo por la tarde. Estos contaminantes alcanzaron su valor máximo alrededor de las 08:00-09:00 Hora Local (HL). Se presentó una buena correlación en el ajuste lineal de BC-CO, BC-CO<sub>2</sub> y CO-CO<sub>2</sub>, lo que sugiere que estos contaminantes provendrían de las mismas fuentes. Se observó un efecto fin de semana (valores más bajos del BC, CO y CO<sub>2</sub> el fin de semana en comparación con los de días laborables), principalmente en las horas de máximo tráfico. Al no existir estudios de mediciones continuas de BC, CO y CO<sub>2</sub>; desarrollamos esta investigación para determinar las tendencias diarias de estos contaminantes y sus correlaciones mutuas en una zona periurbana, en Querétaro.

**Palabras clave:** Carbono negro, dióxido de carbono, efecto fin de semana, monóxido de carbono.

### ABSTRACT

In Juriquilla-Queretaro, the mass concentration of black carbon (BC), the mixing ratio of carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) were measured. Measurements were made from March 1 to April 30, 2016. In April, the mean values of BC (1.23 µg / m<sup>3</sup>) and CO (0.30 ppm) were higher than their corresponding values for March (1.08 µg / m<sup>3</sup> and 0.26 ppm, respectively). CO<sub>2</sub> did not variate in these months and maintains almost a stabilized value around 406 ppm. The daily trends of BC, CO, and CO<sub>2</sub> were similar with a pronounced maximum in the morning and a minimum in the afternoon. These pollutants reach a high level around 08:00-09:00 Local Time (LT). A good correlation was estimated in the linear regression of BC-CO, BC- CO<sub>2</sub>, and CO- CO<sub>2</sub>, suggesting that these pollutants proceed from the same sources. A weekend effect (lower values of BC, CO, and CO<sub>2</sub> on the weekend compared to working days) was mainly observed during rush-hour traffic. As there are no studies of continuous measurements of BC, CO, and CO<sub>2</sub>, this research was conducted to determine the daily trends of these pollutants and their mutual correlations in a peri-urban area of Queretaro.

**Keywords:** Black carbon, carbon dioxide, weekend effect, carbon monoxide.

<sup>1</sup>Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510, México.

<sup>2</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores s/n, Tacna, 23004, Perú.

<sup>3</sup>MDI-Juriquilla, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, Boulevard Juriquilla 3001, Col. Juriquilla, Querétaro, 76230, México.

<sup>4</sup>Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510, México.

<sup>5</sup>Department of Physics. University of Nevada, 1664 N. Virginia Street, Reno, Nevada, 89557, USA.

\*Autor de correspondencia: rafael.linian@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente por gases, pero también contiene materia líquida y sólida en forma de partículas. Las partículas pueden ser sólidas o líquidas, con diámetros entre  $\sim 0.002 \mu\text{m}$  y  $\sim 100 \mu\text{m}$ . El extremo inferior del rango de tamaño no está definido claramente porque no hay un criterio aceptado, en el cual un grupo de moléculas se convierta en una partícula. El extremo superior corresponde al tamaño de llovizna fina o arena muy fina; estas partículas son tan grandes que rápidamente precipitan. Las partículas más importantes para la física y química atmosférica se encuentran en el rango de  $0.002 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$  (Finlayson & Pitts, 2000).

Un aerosol es definido como una suspensión de partículas finas sólidas o líquidas en un gas. Se emiten directamente como partículas (aerosol primario) o se forman en la atmósfera mediante procesos de conversión de gas a partícula (aerosol secundario). La diferencia entre los aerosoles y las partículas radica en que un aerosol incluye tanto las partículas como el gas en el que están suspendidas. Los aerosoles pueden ser de origen natural o antropogénico. (IPCC, 2013; Finlayson & Pitts, 2000; Seinfeld & Pandis, 2006).

El Carbono Negro (*Black Carbon*, BC) es un tipo de material carbonoso que se forma principalmente en llamas durante la combustión incompleta y se emite directamente a la atmósfera. Se encuentra generalmente en aerosoles atmosféricos que contienen otros materiales, muchos de los cuales son emitidos junto con el BC desde una variedad de fuentes (IPCC, 2013; Bond et al., 2013). También, es emitido en la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa (Kondo et al., 2006; Han et al., 2009). El BC tiene muy baja reactividad química en la atmósfera; su proceso de remoción principal a la superficie es a través del depósito húmedo o seco. Similar a los gases de efecto invernadero, como agente de calentamiento climático, el BC puede influenciar en los procesos de formación de nubes, el derretimiento de la nieve y el albedo.

En la atmósfera, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas traza dominante y es el mayor contribuyente al incremento del forzamiento radiativo. Entre 1750

y 2011, las emisiones antropogénicas de  $\text{CO}_2$  fueron de  $555 \pm 85$  Petagramos ( $\text{Pg} = 10^{15}$  gramos). Estas emisiones provienen principalmente de la combustión de combustibles fósiles ( $375 \pm 30 \text{ Pg}$ ) y las derivadas de cambios de uso de suelos ( $180 \pm 80 \text{ Pg}$ ) (IPCC, 2013). Los océanos y ecosistemas terrestres actúan como sumideros; además, almacenan aproximadamente la mitad de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , la otra mitad ( $240 \pm 10 \text{ Pg}$ ) permanecen en la atmósfera. La relación de mezcla de  $\text{CO}_2$  troposférico ha aumentado de 278 ppm (en 1750) a 390.5 ppm (en 2011) (Ballantine et al., 2012; IPCC, 2013). Las mediciones de  $\text{CO}_2$  exhiben un ciclo estacional. En el hemisferio norte, durante la primavera y el verano, el  $\text{CO}_2$  atmosférico disminuye a medida que el carbono se incorpora a las plantas frondosas; mientras que en el otoño e invierno (octubre a febrero) se incrementa los niveles de  $\text{CO}_2$ , por un dominio de la respiración y descomposición de las plantas (Seinfeld & Pandis, 2006).

El monóxido de carbono atmosférico (CO) es producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles. En las grandes zonas urbanas de los países desarrollados, la mayor fuente son los escapes de los vehículos ligeros a gasolina (*light duty gasoline vehicles*, *LDGVs*). Las fuentes naturales de CO incluyen CO de la quema de biomasa y la oxidación de material orgánico, tal como el metano e isopreno, CO de procesos biológicos en suelos, CO de vegetación y termitas, y CO del océano (Finlayson & Pitts., 2000). Al CO no se le considera como un gas de efecto invernadero; sin embargo, es el contaminante primario más abundante en la atmósfera. Según la Norma Oficial Mexicana, el límite máximo permisible (LMP) del CO es 11 ppm, promedio móvil de 8 horas. Por otro lado, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*, EPA) establece como LMP 35 ppm, promedio máximo de una hora; y 9 ppm, promedio máximo de ocho horas (Olivares, 2016).

El objetivo general de este trabajo fue determinar la tendencia diaria y mensual de las concentraciones del BC, CO y  $\text{CO}_2$ ; además, establecer la influencia de los parámetros meteorológicos sobre estos contaminantes, en un sitio en pleno desarrollo urbanístico (zona periurbana) en Querétaro.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Sitio de medición: Juriquilla-Querétaro

El observatorio de la RUOA en Juriquilla-Querétaro (JQRO) se encuentra en el campus de la UNAM en Juriquilla, ubicado en el límite norte del Área Metropolitana de Querétaro (20°42'11" N; 100°26'50" O, 1893 m s. n. m). La toma de muestras de aire se realizó aproximadamente a 15 m s. n. m. Este campus está rodeado de áreas residenciales y comerciales, adyacentes a una carretera con tránsito mixto.

Querétaro tiene 1.2 millones de habitantes (aproximadamente el 45 % de la población del Estado) y está ubicada a 220 km al noroeste de la Ciudad de México. Su clima predominante es templado semiseco, con un rango de temperatura de 12 °C a 20°C y precipitación entre 500 mm y 700 mm (INEGI, 2018).

### Métodos e instrumentos de medición

Para el análisis de las variaciones mensuales de concentración en masa de BC, relación de mezcla de CO y CO<sub>2</sub>, y los parámetros meteorológicos (humedad relativa, temperatura y velocidad del viento) se obtuvieron sus valores horarios promediando las mediciones registradas en minutos o segundos. Posteriormente, los datos horarios se agruparon por meses y la temporada seca caliente, que va de marzo a abril en la región central de la república de los Estados Unidos Mexicanos (Jáuregui, 2002; de Foy *et al.*, 2005; Bravo *et al.*, 2014).

El BC se midió *in situ* y en forma continua, utilizando un Extinciómetro Fotoacústico (*Photoacoustic Extinctionmeter*, PAX, DMT Inc.). Este instrumento realiza mediciones directas de las propiedades ópticas de las partículas. Utiliza un diodo láser modulado a 1500 Hz, a una longitud de onda de 870 nm (específica para partículas de carbono negro). Un flujo nominal de muestras de aerosol de 1 L/min pasa a través del PAX utilizando una bomba de vacío interna controlada por dos orificios críticos. Las mediciones de absorción utilizan tecnología fotoacústica (Arnott *et al.*, 1999, 2000). Un rayo láser dirigido a través de la corriente de aerosol se modula a la frecuencia de resonancia de la cámara acústica. Las partículas absorbentes se calientan y transfieren rápidamente el calor al aire circundante. El calentamiento periódico produce

ondas de presión que pueden detectarse con un micrófono sensible. El coeficiente de absorción es directamente proporcional a la presión detectada por el micrófono. La concentración de masa de carbono negro (BC) se obtiene a partir del coeficiente de absorción.

Un analizador que utiliza la técnica de la Espectroscopia de Cavidad “Ring-Down” (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*, CRDS, G2401, Picarro Inc.) fue utilizado para realizar mediciones continuas y simultáneas del CO y CO<sub>2</sub> a nivel de trazas. Este espectrómetro de cavidad tipo “ring-down” se compone básicamente de: a) un láser; b) una cavidad óptica resonante con dos o más espejos de alta reflectividad; y, c) un fotodetector. La luz del láser se dirige a la pequeña cavidad y cuando la acumulación de luz en la cavidad (con la muestra) alcanza la intensidad requerida, el láser se apaga. El fotodetector detecta la pequeña cantidad de luz que se filtra a través de uno de los espejos para producir una señal que es directamente proporcional a la intensidad en la cavidad. La intensidad de la luz en la cavidad decae exponencialmente con una constante de tiempo,  $\tau$ , que depende de las pérdidas debidas a los espejos de la cavidad y la absorción y dispersión de la muestra que se está midiendo. La absorbancia óptica de la muestra está determinada por la tasa de disipación de luz en la cavidad óptica. De esta manera se mide las concentraciones o relaciones isotópicas de un gas de interés (Crosson, 2008; Chen *et al.*, 2010).

### Análisis de datos

Para el análisis estadístico de las mediciones de los contaminantes BC, CO y CO<sub>2</sub>, durante los meses de marzo y abril, utilizamos sus valores registrados en minutos. Los datos horarios de BC, CO y CO<sub>2</sub> se obtuvieron promediando las mediciones registradas (en segundos o minutos) se agruparon de dos maneras: (1) para toda la temporada seca caliente y (2) por meses (marzo y abril). Similarmente, se agruparon los promedios horarios de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Las gráficas presentadas en este trabajo se realizaron utilizando el programa *OriginPro 9.64*. Para las gráficas se utilizan los valores horarios de los contaminantes BC, CO y CO<sub>2</sub>. En la Tabla 1, se muestra la estadística de todo el periodo estacional estudiado (seca caliente) agrupados por días: todos los días (TD), día de semana (DS) y fin de semana (FS).

Tabla 1. Estadística estacional del BC, CO y CO<sub>2</sub>, durante la temporada seca caliente para todos los días, día de semana (día laborable) y fin de semana, en Querétaro, México.

| Contaminante    | Días | Media  | D.E  | Mínimo | Mediana | Máximo |
|-----------------|------|--------|------|--------|---------|--------|
| BC              | TD   | 1.15   | 0.81 | 0.00   | 0.91    | 6.92   |
|                 | DS   | 1.22   | 0.86 | 0.06   | 0.96    | 6.92   |
|                 | FS   | 1.00   | 0.67 | 0.00   | 0.78    | 5.27   |
| CO              | TD   | 0.28   | 0.17 | 0.11   | 0.23    | 1.73   |
|                 | DS   | 0.29   | 0.19 | 0.11   | 0.23    | 1.73   |
|                 | FS   | 0.26   | 0.12 | 0.13   | 0.22    | 0.76   |
| CO <sub>2</sub> | TD   | 406.26 | 8.08 | 395.31 | 403.75  | 451.15 |
|                 | DS   | 406.67 | 8.75 | 395.45 | 403.92  | 451.15 |
|                 | FS   | 405.21 | 5.88 | 395.31 | 403.32  | 431.61 |

TD = todos los días, DS = día de semana, FS = Fin de semana, DE = desviación estándar

## RESULTADOS

La Figura 1a-c muestra los gráficos de caja y bigotes, utilizados para representar la distribución de las mediciones del BC, CO y CO<sub>2</sub>, durante marzo, abril y la temporada seca caliente, respectivamente. En estos gráficos, el círculo y la línea horizontal en el interior de la caja representan el valor medio y la mediana, respectivamente. El fondo de la caja representa al cuartil 25 %; y su tope, al cuartil 75 %.

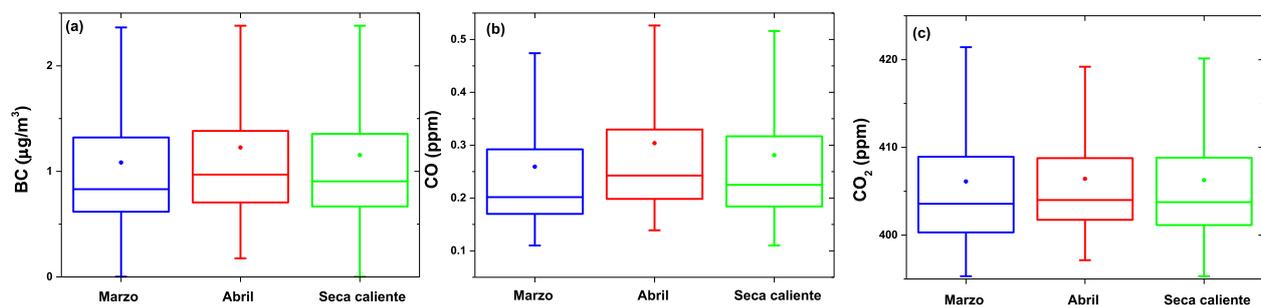


Figura 1. Gráfico de caja y bigotes, para representar la distribución de los valores horarios del (a) BC, (b) CO y (c) CO<sub>2</sub> en Querétaro, México.

La Figura 2a-c muestra la distribución, mediante gráficos de caja y bigotes, de las mediciones de los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), durante marzo, abril y la temporada seca caliente, respectivamente. Es conocida la anticorrelación entre la humedad relativa y la temperatura, lo que se evidencia en estos gráficos. Cabe destacar la menor temperatura y la relativamente mayor rapidez del viento en marzo, comparados con sus valores correspondientes al mes de abril. El valor promedio de la velocidad del viento en el mes de marzo fue de 3.25 m/s; mientras que, en abril fue de 2.65 m/s. La temperatura promedio en abril fue 21.24 °C, y en marzo aproximadamente 3 °C menor (18.12 °C). Ambos parámetros son importantes para hacer una evaluación cualitativa del desarrollo de la capa de mezcla atmosférica.

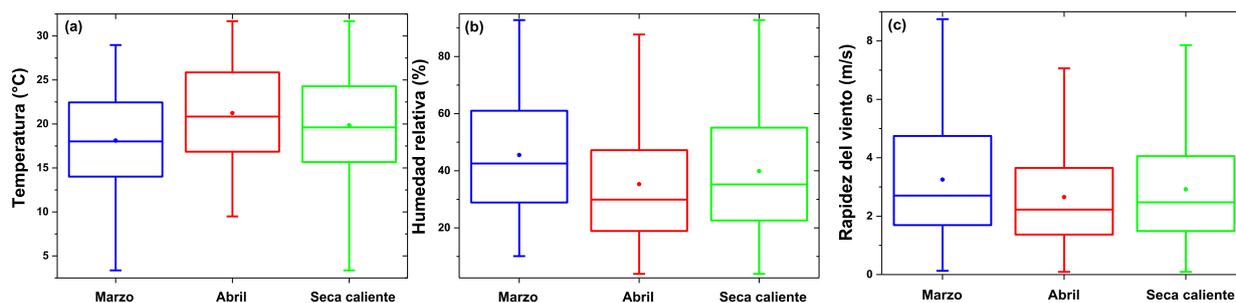


Figura 2. Gráfico de caja y bigotes para representar la distribución de los valores de (a) Temperatura, (b) Humedad relativa y (c) rapidez del viento en Querétaro, México.

### Serie de tiempo de concentraciones de BC, CO y CO<sub>2</sub>

La Figura 3 muestra las series de tiempo de los valores horarios de BC, CO y CO<sub>2</sub> en Querétaro, desde el 01 de marzo al 30 de abril del 2016. Los valores de BC, CO y CO<sub>2</sub> mostraron variaciones temporales correlacionadas. La estadística de estos contaminantes, durante la temporada seca caliente, se resume en la Tabla 1. Durante la estación seca caliente, la concentración en masa del BC osciló entre 0.00 y 6.92  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un valor promedio de 1.15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La relación de mezcla del CO osciló entre 0.11 y 1.73 partes por millón por volumen (ppmv o ppm), con un valor medio de 0.28 ppm; mientras que la del CO<sub>2</sub> tuvo una variación de 395.31 hasta 451.15 ppm, obteniendo un valor promedio de 406.26 ppm.

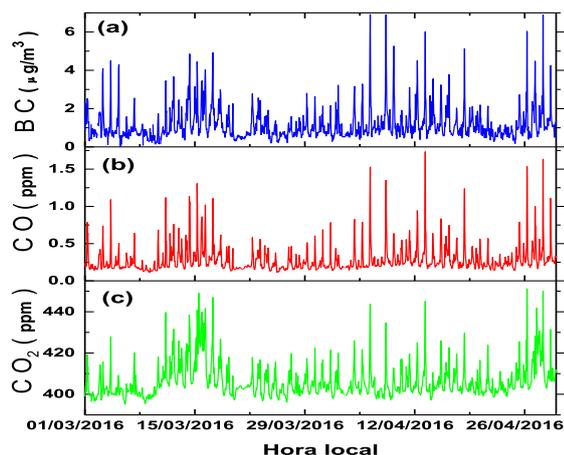


Figura 3. Serie de tiempo de las concentraciones de: (a) BC, (b) CO y (c) CO<sub>2</sub>, del 01 de marzo al 30 de abril del 2016 en Querétaro, México.

Las variaciones mensuales de BC, CO y CO<sub>2</sub> en Querétaro son evidentes (Tabla 1 y Figura 3). El valor promedio de la concentración de BC en abril (1.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es mayor al valor de BC, correspondiente a marzo (1.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Similarmente, el valor promedio de la relación de mezcla del CO en abril (0.30 ppm) es mayor que en marzo (0.26 ppm); mientras que el CO<sub>2</sub> no sufre variación en estos meses y mantiene un valor que esta alrededor de 406 ppm.

### Ciclos diarios de BC, CO y CO<sub>2</sub>

En la Figura 4(a-c) se muestran las tendencias diarias de la concentración en masa del carbono

negro (BC), y las relaciones de mezcla del monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), durante la estación seca caliente en Querétaro. El ciclo diario del BC presenta un máximo pronunciado por la mañana y un mínimo por la tarde (Figura 4.a). El BC empieza a incrementarse rápidamente, aproximadamente desde las 06:00-07:00 HL, hasta las 08:00-09:00 HL, tiempo en el que alcanza su valor horario máximo de 2.55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Luego, el BC cae hasta alcanzar su mínimo por la tarde, alrededor de las 15:00-16:00 HL.

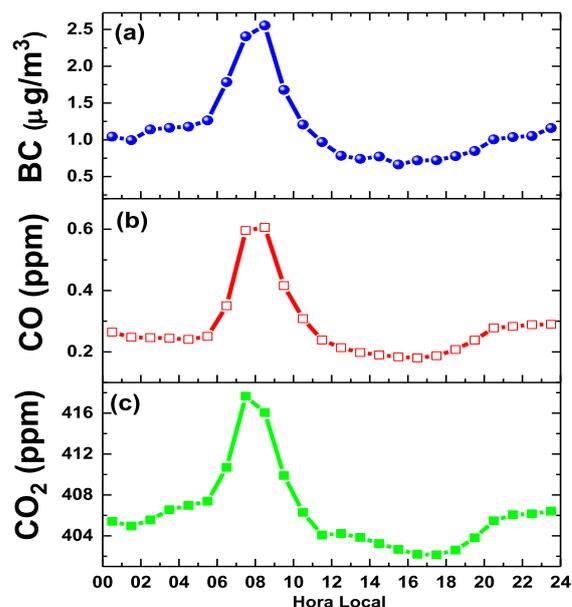


Figura 4. Ciclo diario de las concentraciones de (a) BC, (b) CO y (c) CO<sub>2</sub>, durante la temporada seca caliente del 2016 en Querétaro, México.

La Figura 4.b muestra la variación diaria estacional del CO. Los ciclos diarios del CO son muy similares a los del BC, dado que, bajo las mismas condiciones meteorológicas, ambos podrían tener las mismas fuentes. La variación diaria del CO<sub>2</sub> en Querétaro se muestra en la Figura 4.c. El ciclo diario estacional del CO<sub>2</sub> presenta dos máximos (temprano en la mañana y en la noche) y un mínimo (en la tarde). El primer máximo lo alcanza entre las 07:00-08:00 HL, probablemente se deba al incremento de las emisiones vehiculares.

**Correlaciones: BC-CO, BC-CO<sub>2</sub> y CO-CO<sub>2</sub>**

En este trabajo se realizaron las siguientes correlaciones: BC-CO, BC-CO<sub>2</sub> y CO-CO<sub>2</sub>, con el fin de estimar las fuentes importantes de BC y CO a partir de las pendientes de estas correlaciones, y poder establecer una metodología que permita estimar las relaciones de emisión BC/CO, BC/CO<sub>2</sub> y CO/CO<sub>2</sub>.

La Figura 5 muestra los diagramas de dispersión de (a) BC-CO, (b) BC-CO<sub>2</sub> y (c) CO-CO<sub>2</sub>, para la estación seca caliente en Querétaro. Las pendientes de las rectas en los diagramas: BC-CO ( $\Delta BC/\Delta CO$ ), BC-CO<sub>2</sub> ( $\Delta BC/\Delta CO_2$ ) y CO-CO<sub>2</sub> ( $\Delta CO/\Delta CO_2$ ) se obtuvieron mediante el método de mínimos cuadrados. EL BC correlaciona muy bien con CO, con un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0.79 y una pendiente  $\Delta BC/\Delta CO = 4.18 \mu g m^{-3}/ppm$ , lo cual se puede observar en la Figura 5.a. La Figura 5.b muestra la gráfica de dispersión BC-CO<sub>2</sub>. El R<sup>2</sup> del ajuste lineal es 0.56. La pendiente  $\Delta BC/\Delta CO_2 = 0.08 \mu g m^{-3}/ppm$ , en la estación seca caliente. En la Figura 5.c se muestra la gráfica de dispersión CO-CO<sub>2</sub> en la estación seca caliente. La correlación es buena, con un R<sup>2</sup> de 0.64 y una pendiente  $\Delta CO/\Delta CO_2 = 0.02 ppm/ppm$ . En general, las pendientes  $\Delta BC/\Delta CO$ ,  $\Delta BC/\Delta CO_2$  y  $\Delta CO/\Delta CO_2$  correlacionan bien.

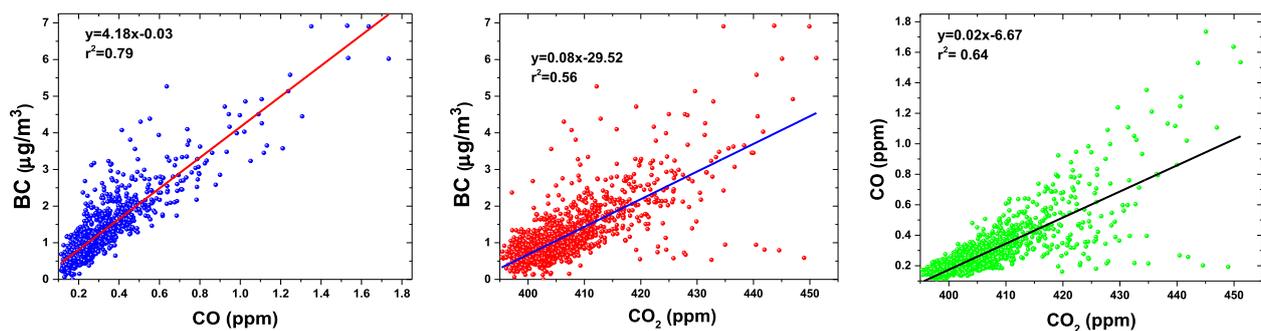


Figura 5. Gráficas de dispersión de (a) BC-CO, (b) BC-CO<sub>2</sub> y (c) CO-CO<sub>2</sub>, para la temporada seca caliente, en Querétaro, México. Se muestra la ecuación de la recta obtenida mediante ajuste lineal y el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>).

**El efecto fin de semana**

El efecto fin de semana de BC, CO y CO<sub>2</sub> se caracteriza por las bajas concentraciones de estos contaminantes en fines de semana comparadas con las de días de semana, debido a una disminución en las actividades antropogénicas (disminución de la actividad laboral y de las instituciones educativas) y a una menor densidad de tráfico vehicular durante el fin de semana. La Tabla 1 muestra las concentraciones promedio del BC, CO y CO<sub>2</sub>, junto a su respectiva desviación estándar, para los días de semana y fines de semana. El valor promedio de la concentración de BC decrece en 18 % los fines de semana (de 1.22  $\mu g/m^3$  a 1.00  $\mu g/m^3$ ). La concentración promedio

del CO de un día laborable a un día de fin de semana cae aproximadamente 10 % (de 0.29 ppm a 0.26 ppm); mientras que el valor promedio de la concentración del CO<sub>2</sub> se reduce menos del 1 % (de 406.67 ppm a 405.21 ppm). La disminución de los valores máximos de las concentraciones entre un día de semana y fin de semana son aproximadamente 24 %, 56 % y 4 % para el BC, CO y CO<sub>2</sub>, respectivamente. La Figura 6 muestra las variaciones diarias de las concentraciones de (a) BC, (b) CO y (c) CO<sub>2</sub>, para un día de semana y un día de fin de semana (sábado y domingo) en Querétaro. Las tendencias diarias de estos contaminantes para un día laborable son similares a sus ciclos diarios para todos los días mostrados en la Figura 5.

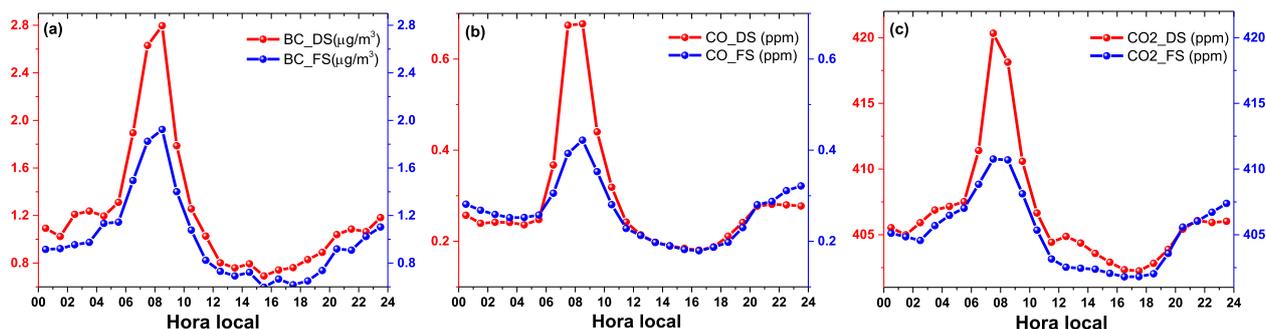


Figura 6. Ciclo diario de las concentraciones de (a) BC, (b) CO y (c) CO<sub>2</sub>, para días de semana (DS) y días de fin de semana (FS) en Querétaro, México.

## DISCUSIÓN

En Querétaro, los valores del BC y CO son mayores en el mes de abril que en marzo (Figura 3). Este comportamiento mensual se debería al mayor valor promedio de la rapidez del viento en marzo (3.25 m/s), que en abril (2.65 m/s). A mayor ventilación, menor es la concentración de contaminantes. Mientras que el valor promedio del CO<sub>2</sub> no sufre variación en estos meses y mantiene un valor que está alrededor de 406 ppm. Es conocido que las concentraciones absolutas de BC, CO y CO<sub>2</sub> presentan una fuerte dependencia de las emisiones y las condiciones meteorológicas (Han et al., 2009; Zhuang et al., 2014; Zhang et al., 2015).

El patrón diario estacional del BC se puede explicar mediante la combinación de los dos factores que afectan su concentración: emisiones y condiciones meteorológicas. El incremento de la concentración del BC, que se inicia en horas de la madrugada hasta alcanzar su valor máximo diario (08:00-09:00 HL) coincide con el inicio de las actividades antropogénicas, como la circulación del transporte público y privado en la ciudad. La posterior caída del BC, desde su máximo hasta su mínimo, coincide con el crecimiento diurno de la profundidad de la capa de mezcla (capa de la atmósfera adyacente al suelo donde los contaminantes emitidos son dispersados por convección o turbulencia), desde su valor mínimo hasta su máxima profundidad, que alcanza por las tardes, momento donde se dispone de un mayor volumen de aire que facilita la dispersión de los contaminantes.

El segundo aumento de la concentración de BC hasta la noche estaría relacionado con la acumulación más eficiente de BC en la atmósfera,

debido a una disminución de la altura de la capa de mezcla y la velocidad del viento. Los ciclos diarios del CO son muy similares a los del BC. La concentración de CO depende fuertemente de las emisiones de los vehículos ligeros a gasolina (LDGVs) y el BC de los vehículos pesados a diésel (HDDVs). El ciclo diario estacional del CO<sub>2</sub> presenta una tendencia similar a las del BC y CO. Después de la salida del sol, la absorción fotosintética de CO<sub>2</sub> por la vegetación y el desarrollo de la altura de la capa de mezcla hacen que las concentraciones de CO<sub>2</sub> disminuyan gradualmente y alcancen un mínimo estable por la tarde. Por la noche, cuando domina la respiración y la capa de mezcla disminuye, el CO<sub>2</sub> se incrementa y alcanza un segundo máximo.

La buena correlación observada entre sí, por estos contaminantes (Figura 5), sugiere que los contaminantes provendrían de fuentes móviles (transporte urbano). Estudios previos en áreas urbanas, demuestran que BC correlaciona muy bien con el CO, debido a que ambos contaminantes primarios son emitidos durante la combustión incompleta de combustibles basados en carbono, especialmente combustibles fósiles (Baumgardner et al., 2002; Kondo et al., 2006; Han et al., 2009). Las correlaciones entre BC y CO dependen principalmente del tipo de fuente de emisión, aun cuando se encuentren en la misma región (Bond et al., 2006). Si BC y CO provienen de la misma fuente se esperan altas correlaciones (Zhuang et al., 2012).

Los valores promedio de las concentraciones de BC y CO presentan un notable efecto fin de semana; mientras que la concentración promedio del CO<sub>2</sub> no cambia notablemente de un día de semana a uno de fin de semana. Las tendencias diarias para un día de fin de semana presentan

máximos menos agudos y simultáneos con los de un día de semana. Además, se observa que las concentraciones de CO, durante la noche y las madrugadas de los fines de semana son mayores a los valores del CO durante los días laborables o día de semana. Estos resultados indican que la variación diaria de la actividad antropogénica fue diferente entre los días laborables y los fines de semana. De hecho, el tráfico (fuente más importante de emisiones primarias de BC y CO, y menor medida de CO<sub>2</sub>) presenta patrones muy diferentes durante los días de semana y fines de semana. En general, en todo el ciclo diario, el tráfico de vehículos ligeros a gasolina (LDGVs) y vehículos pesados a diésel (HDDVs) es menor los fines de semana, excepto durante la madrugada, donde el tráfico de los LDGVs es mucho mayor, lo que explica que las concentraciones de CO de un día de fin de semana sean superiores a los de un día de semana en las madrugadas.

## CONCLUSIONES

Durante la estación seca caliente, el valor promedio de la concentración de BC en abril (1.23 µg/m<sup>3</sup>) es mayor al valor de BC correspondiente a marzo (1.08 µg/m<sup>3</sup>). Similarmente, el valor promedio de la relación de mezcla del CO en abril (0.30 ppm) es mayor que marzo (0.26 ppm); mientras que el CO<sub>2</sub> no sufre variación en estos meses y mantiene un valor que esta alrededor de 406 ppm.

Probablemente, la razón de los mayores valores de estos contaminantes en abril sea por el mayor valor promedio de la rapidez del viento en marzo (3.25 m/s) que en abril (2.65 m/s). A mayor ventilación menor es la concentración de contaminantes.

Los ciclos diarios estacionales del BC, CO y CO<sub>2</sub> presentan un máximo pronunciado por la mañana y un mínimo por la tarde. Empiezan a incrementarse rápidamente desde las 06:00-07:00 HL hasta las 08:00-09:00 HL aproximadamente, tiempo en el que alcanzan su valor horario máximo. Luego, la tendencia cae hasta alcanzar su mínimo por la tarde, alrededor de las 15:00-16:00 HL.

En general, las correlaciones BC-CO, BC-CO<sub>2</sub>, y CO-CO<sub>2</sub> fueron buenas con valores de sus pendientes de 4.18 µgm<sup>-3</sup>/ppm, 0.08 µgm<sup>-3</sup>/ppm, y 0.02 ppm/ppm; respectivamente. Estas buenas correlaciones observadas podrían

deberse al hecho de que estos contaminantes provengan de las mismas fuentes, vinculadas a la combustión incompleta de combustibles basados en carbono, especialmente combustibles fósiles. Los valores promedios de las concentraciones de BC y CO presentan un notable efecto fin de semana; mientras que la concentración promedio del CO<sub>2</sub> no cambia notablemente de un día de semana a uno de fin de semana.

Las tendencias diarias para un día de fin de semana presentan máximos menos agudos y simultáneos con los de un día de semana. El mayor decrecimiento del BC que el CO está más vinculado al decrecimiento de la combustión de combustible diésel que de gasolina.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM y al CONACYT, por el valioso apoyo otorgado, fundamental para realizar esta investigación.

## REFERENCIAS

- Arnott, W. P., Moosmüller, H., Rogers, C. F., Jin, T. & Bruch, R. (1999). Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosols: Instrument description. *Atmos. Environ.*, 33, 2845–2852.
- Arnott, W. P., Moosmüller, H. & Walker, J. W. (2000). Nitrogen dioxide and kerosene-flame soot calibration of photoacoustic instruments for measurement of light absorption by aerosols. *Rev. Sci. Instr.*, 71(7), 4545–4552.
- Ballantine, A.P., Alden, C.B., Miller, J.B., Tans, P.P. and White, J.W.C. (2012). Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 488, 70-73.
- Baumgardner, D., Raga, G., Peralta, O., Rosas, I., Castro, T., Kuhlbusch, T., John, A. & Pezolt, A. (2012). Diagnosing black carbon trends in large urban areas using carbon monoxide measurements. *J. Geophys. Res.*, 107 ( D 2 1 ), 8 3 4 2 , d o i : 1 0 1029/2001JD000626
- Bond, T.C. & Bergstrom, R.W. (2006). Light Absorption by carbonaceous Particles: An Investigative Review. *Aerosol Science and*

- Technology*, 40, 27-67. doi: 10.1080/02786820500421521
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schultz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G. & Zender, C.S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380-5552. doi: 10.1002/jgrd.50171
- Bravo, J.L., Azpra, E., Zarraluqui, V. & Gay, C. (2014). Some variations of the rainfall in Mexico City from 1954 to 1988 and their statistical significance, *Atmósfera*, 27(4), 367-376. doi: 10.20937/ATM.2014.27.04.03
- Chen, H., Winderlich, J., Gerbig, C., Hofer, A., Rella, C. W., Crosson, E. R., Van Pelt, A. D., Steinbach, J., Kolle, O., Beck, V., Daube, B. C., Gottlieb, E. W., Chow, V. Y., Santoni, G. W. & Wofsy, S. C. (2010). High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique. *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 375–386, doi:10.5194/amt-3-375-2010
- Crosson, E. R. (2008). A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor. *Appl. Phys. B*, 92, 403–408, doi:10.1007/s00340-008-3135-y
- De Foy B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L. & Molina, M. (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2267-228. doi: 10.5194/acp-5-2267-2005
- Finlayson-Pitts, B. & Pitts, J. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments and Applications*, First Edition; Academic Press,.
- Han, S., Kondo, Y., Oshima, N., Takegawa, N., Miyazaki, Y., Hu, M., Lin, P., Deng, Z., Zhao, Y., Sugimoto, N. & Wu, Y. (2009). Temporal variations of elemental carbon in Beijing, *J. Geophys. Res.*, 114, D23202, doi: 10.1029/2009JD012027.
- INEGI. (2018). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia. Retrieved January 18, 2018, from <http://www.inegi.org.mx/default.aspx>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). *Clouds and aerosols In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge; United Kingdom and New York,
- Jáuregui, E. (2002). The climate of the Mexico City Air Basin: its effects on the formation and transport of pollutants. In: Fenn, Mark E., Bauer, L.I. de, Hernandez-Tejeda, Tomas (Eds.), *Ecological studies. Urban Air Pollution and Forest*, vol. 56. Springer, New York, pp. 86–117. Chapter 5. doi: 10.1007/978-0-387-22520-3\_5.
- Kondo, Y., Komazaki, Y., Miyazaki, Y., Moteki, N., Takegawa, N., Kodama, D., Deguchi, S., Nogami, M., Fukuda, M., Miyakawa, T., Morino, Y., Koike, M., Sakurai, H. & Ehara, K. (2006). Temporal variations of elemental carbon in Tokyo. *J. Geophys. Res.*, 111, D12205. doi:10.1029/2005JD006257.
- Olivares, S. (2016). *Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Querétaro para el año 2013* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM, Querétaro.
- Seinfeld, J. & Pandis, S. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From Air Pollution to Climate Change*, Second Edition; John Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, X., Rao, R., Huang, Y., Mao, M., Berg, M.J. & Sun, W. (2015). Black carbon aerosols in urban central China. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.*, 150, 3-11, doi: 10.1016/j.jqsrt.2014.03.006
- Zhuang, B. L., Wang, T.J., Liu, J., Li, S., Xie, M., Yang, X.Q., Fu, C.B., Sun, J.N., Yin, C.Q., Liao, J.B., Zhu, J.L. & Zhang, Y. (2014). Continuous measurement of black carbon aerosol in urban Nanjing of Yangtze River Delta, China. *Atmos. Environ.*, 89, 415 – 424, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.02.052.