

Medición remota de ozono atmosférico en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, utilizando la técnica Doas

Albert Orantes Jonapá¹
Carlos García Lara¹
Rubén Vázquez Sánchez¹
Raúl González Herrera¹
Jorge Camas Anzueto²

RESUMEN

Se presenta una breve descripción de un sistema de monitoreo remoto de contaminantes basado en espectroscopía por absorción óptica diferencial, el cual permite detectar trazas de contaminantes presentes en la atmósfera, este sistema fue colocado en las instalaciones de ciudad universitaria de la UNICACH, monitoreando una extensión lineal de aproximadamente 2.9 km, los resultados obtenidos fueron para determinar concentraciones de ozono, evaluando además la influencia de las condiciones climáticas en los resultados, al final se realiza una comparación con un sistema de detección comercial, observando una buena correlación entre ellos.

Palabras clave: UV DOAS, medición óptica remota, espectroscopia

ABSTRACT

We presents a brief description of a remote monitoring pollutants system based on differential optical absorption spectroscopy, which

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Facultad de Ingenierías, Libramiento Norte Poniente 1150
Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, C. P. 29039,
e-mail: carlosmgl10@yahoo.com.mx

²Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Carretera Panamericana km 1080
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, C. P. 29000

can detect traces of pollutants in the atmosphere, this system was placed in campus facilities of UNICACH, monitoring a linear extension of about 2.9 km, the results were to determine ozone concentrations, also evaluating the influence of weather conditions on the results, at the end was realized a comparison with a common detection system, having a good correlation between them.

Keywords: UV DOAS, remote optical measurement techniques, spectroscopy

INTRODUCCIÓN

La atmósfera constituida naturalmente por gases como nitrógeno (N_2), 78%, oxígeno (O_2), 21%, argón (Ar), 1% y dióxido de carbono (CO_2), 0.04%, ha sufrido alteraciones que han provocado un desequilibrio en ésta, debido a las emisiones de automóviles, industria, y en áreas rurales por emisiones procedentes de incendios forestales (Baird, 2001), se ha visto alterada en su composición química afectando de forma directa la calidad de vida de los seres vivos. Dentro de la gran variedad de contaminantes presentes en la atmósfera se encuentran el monóxido de carbono,

dióxido de azufre, partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV), siendo los dos últimos los que constituyen el smog, debido a la formación de ozono y otras moléculas oxidantes (Spiro, 2004).

Existen una gran variedad de técnicas de medición de estos contaminantes (Creswell, 1979). Sin embargo, debido a que se dispersan rápidamente en la atmósfera bajo condiciones de flujo no estacionario, las concentraciones son extremadamente bajas, en algunas ocasiones por debajo de niveles de una parte por millón (ppm), utilizando métodos químicos de contacto, donde el gas es extraído del medio ambiente para su medición y caracterización, mediante reacciones químicas específicas, se ha logrado su detección y concentración. Sin embargo, presentan diferentes desventajas como son muestreos por largos periodos de tiempo, existencia de muchas fuentes de error relacionadas a la extracción y manipulación del contaminante y la cuantificación resulta complicada (Mercer, 2003).

Por otro lado, existen diferentes técnicas ópticas para la caracterización, detección y control de gases (Helmut, 2007), basada en espectrofotometría, las cuales pueden ser clasificadas en dos bloques: el primero aísla una muestra del medio ambiente y la analiza, mientras que el segundo realiza el análisis

en el lugar, este último puede a su vez ser subdividido en aquellos que requieren de una retroalimentación y los que se realizan en un sistema abierto, conocido como técnica óptica de medición remota (ROMT), utilizada para emisiones de vehículos de combustión (Stedman, 1989), monitoreo de gases tóxicos o explosivos (Chan, *et al.*, 1973), y calidad del aire, por ejemplo en ambientes urbanos (Barrefors, 1997). Esta técnica permite la medición sobre áreas extensas, normalmente de algunos cientos de metros, aunque estas mediciones se ven afectadas por la dispersión y otros mecanismos de interferencia debido al área de monitoreo (Crookell, 2001).

La medición remota de la concentración de contaminantes por técnicas ópticas está basada en la absorción de la radiación electromagnética de longitudes de onda, normalmente en el ultravioleta o infrarrojo y ocasionalmente en el visible, por las moléculas contaminantes. Su funcionamiento se basa en tres modelos básicamente, mediciones dispersivas que utilizan la región UV para compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y para óxidos de nitrógeno (NO_x) (Patterson, *et al.*, 1998), entre otros, y para la región IR para compuestos como monóxido de carbono, dióxido de carbono y amonio (Baum, 2000), mediciones no dispersivas de la cual se realiza la técnica espectroscópica de absorción óptica diferencial (DOAS), técnica es ampliamente utilizada en las regiones del

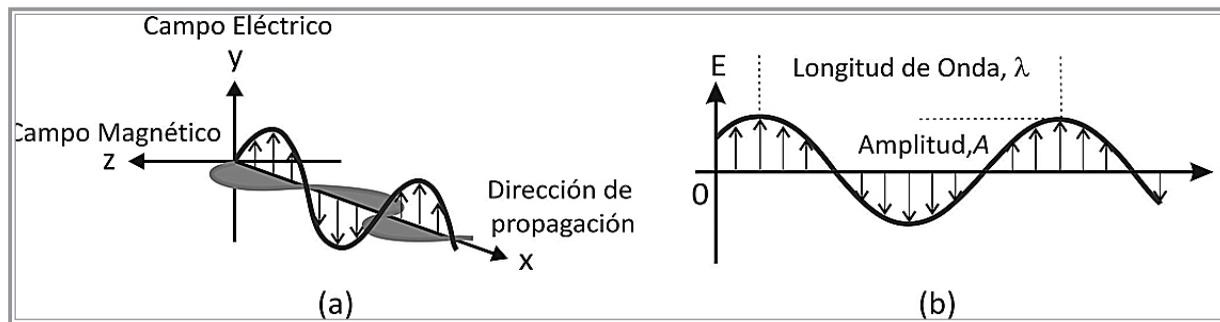


Figura 1 ■ Representación de un haz de radiación monocromática, polarizada en el plano: (a) campo eléctrico y magnético perpendiculares entre sí, respecto a la dirección de propagación, (b) representación bidimensional del vector eléctrico (Skoog, 2000).

infrarrojo (Bishop, 1996) y ultravioleta; además del LIDAR (DIAL), y por último las mediciones con un rango estrecho de longitudes de onda.

TEORÍA DE LAS TÉCNICAS ÓPTICAS

La medición de contaminantes atmosféricos por técnicas ópticas se basa en la interacción de las partículas contaminantes con la radiación electromagnética, esta teoría puede ser representada como un campo eléctrico y magnético que está en fase, con oscilaciones sinusoidales en ángulo recto entre ellos, respecto a la dirección de propagación. La figura 1, presenta la radiación para un haz individual polarizado en el plano yz, moviéndose en la dirección x.

El campo eléctrico es el responsable de la mayoría de los fenómenos que involucran la transmisión, reflexión, refracción y absorción. Muchas de las propiedades de la radiación electromagnética se aplican adecuadamente con un modelo clásico de onda sinusoidal, que utiliza parámetros como la longitud de onda (λ), la frecuencia (ν) y la velocidad de propagación v_p , expresada en metros por segundo

$$v_i = v \cdot \lambda_i \quad (1)$$

Otro parámetro es la amplitud A , definida como la longitud del vector eléctrico en el máximo de la onda. A diferencia de otros fenómenos ondulatorios, como el sonido, la radiación electromagnética no necesita un medio de apoyo para transmitirse y, por tanto, se propaga fácilmente a través del vacío. Es importante tener en cuenta que la frecuencia de un haz de radiación está determinada por la fuente y permanece invariable. Por el contrario, la velocidad de la radiación depende de la composición del medio que atraviesa por tanto se puede ver a partir de la ecuación 1, que la longitud de onda de la radiación depende también del medio. El subíndice i , pone de manifiesto esta dependencia.

En cualquier medio, la propagación de la radiación disminuye a causa de la interacción del campo

electromagnético y la materia. Dado que la frecuencia radiante permanece invariable y viene dada por la fuente, la longitud de onda debe disminuir cuando la radiación pasa del vacío a algún otro medio. Si se toma el tiempo como una variable, la onda en la figura 1b, puede definirse mediante la ecuación

$$y = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

en la que y es el campo eléctrico, A es la amplitud o valor máximo de y , t es el tiempo, ϕ es el ángulo de fase, ω es la velocidad angular del vector y se relaciona con la frecuencia de la radiación ν , por medio de la ecuación

$$\omega = 2\pi\nu \quad (3)$$

Otra característica importante es la transmisión de la radiación, la cual se define como el índice de refracción de un medio, medida de su interacción con la radiación

$$n_i = \frac{c}{v_i} \quad (4)$$

En donde n_i es el índice de refracción para una frecuencia determinada i , v_p es la velocidad de la radiación en el medio y c , es su velocidad en el vacío. La variación del índice de refracción de una sustancia con la longitud de onda o con la frecuencia se denomina *dispersión refractiva*, y se pueden representar en dos tipos de regiones: región de dispersión refractiva normal y dispersión refractiva anómala. En la primera región hay un aumento gradual del índice de refracción al aumentar la frecuencia (o disminuir la longitud de onda), en la segunda región, son aquellos intervalos de frecuencia en las que se observa un cambio brusco del índice de refracción, y siempre ocurre a frecuencias que corresponden a la frecuencia armónica natural asociada con alguna parte de la molécula, átomo o ion de la sustancia.

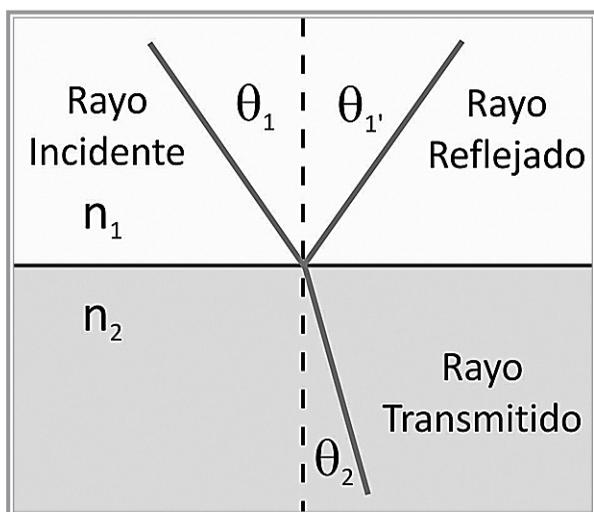


Figura 2 ■ Refracción de la luz al pasar de un medio M1 a otro más denso M2 en el que su velocidad es menor.

Cuando la radiación incide con un ángulo en la interfase entre dos medios transparentes que tienen densidades diferentes, se observa un cambio brusco en la dirección, o refracción, del haz de luz como consecuencia de una diferencia en la velocidad de la radiación en los dos medios. Cuando un haz pasa de un medio menos denso a uno más denso, como se muestra en la figura 2, la desviación se acerca a la normal hasta la interfase. Cuando pasa de un medio más denso a otro menos denso, se observa una desviación separándose de la normal, la magnitud de esta refracción viene dada por la ley de Snell

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5)$$

Cuando la radiación atraviesa una capa de un medio sólido, líquido o gaseoso, ciertas frecuencias pueden eliminarse selectivamente por absorción, un proceso en el que la energía electromagnética se transfiere a los átomos, iones o moléculas que componen la muestra. La absorción provoca que estas partículas pasen de su estado

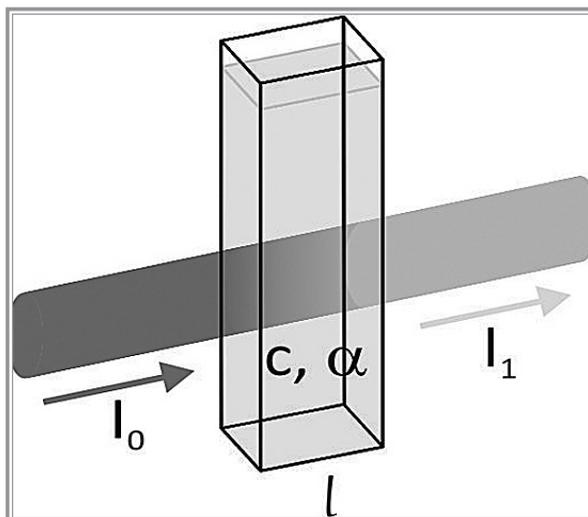


Figura 3 ■ Atenuación de un haz de radiación por una disolución absorbente.

normal a temperatura ambiente, o estado fundamental, a uno o más estados excitados de energía superior. De acuerdo con la teoría cuántica, los átomos, moléculas o iones sólo tienen un número limitado de niveles de energía discretos; de tal modo que para que se produzca la absorción de la radiación, la energía de los fotones excitados debe coincidir exactamente con la diferencia de energía entre el estado fundamental y uno de los estados excitados de las especies absorbentes. Como estas diferencias de energía son características para cada especie, el estudio de las frecuencias de la radiación absorbida proporciona un medio para caracterizar los componentes de una muestra (Skoog, 2000).

La figura 3, muestra un haz de radiación antes y después de atravesar un medio que tiene un espesor b , en cm y una concentración c , de una especie absorbente. Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y los átomos o moléculas absorbentes, la potencia del haz disminuye de P_0 a P .

De lo anterior, la fracción de radiación incidente transmitida por el medio, conocida como *transmitancia* T , está dada por la razón de la potencia de salida y la de

entrada, mientras que la absorbancia A , de un medio es una medida de la disminución de la potencia radiante. Al contrario de la transmitancia, la absorbancia de un medio aumenta cuando la atenuación del haz se hace mayor. El espesor b , por el cual viaja el haz de entrada es otro parámetro importante en la señal de salida, ya que de éste depende la absorción de la luz en relación con la concentración de la solución. La ley de Beer-Lambert (Grutter y Basaldud, 2006), establece que la intensidad de un rayo de luz monocromática disminuye exponencialmente a medida que aumenta la concentración del medio que la absorbe.

Para deducir esta ley, se postula en primer lugar que cada cuanto de luz que penetra una sustancia tiene igual oportunidad de ser absorbido. Esto implica que la luz es monocromática. En segundo lugar, se postula que cada molécula de la sustancia que absorbe tiene igual oportunidad de interceptar y absorber un cuanto de luz, cualquiera que sea su situación dentro de la trayectoria del medio. La intensidad de la radiación $I(\lambda)$, al propagarse por un medio gaseoso como es la atmósfera y sin tomar en cuenta procesos de dispersión, disminuye exponencialmente con la concentración de los gases que la componen (c_i), con los coeficientes de absorción (σ_i) así como con la longitud del medio absorbente (L), con respecto a la intensidad inicial $I_0(\lambda)$.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-L\sigma_i(\lambda)c_i} \quad (6)$$

La ecuación 6, aplica para las técnicas ópticas de percepción remota, las cuales miden las interacciones entre la energía radiante y la materia.

ARREGLO EXPERIMENTAL

Para la medición remota de contaminantes atmosféricos se desarrolló un sistema DOAS pasivo, el cual utilizó un telescopio refractor acromático marca Meade modelo ETX-80AT, el cual cuenta con un ocular, encargado de amplificar la imagen formada por el objetivo, además de un espectrofotómetro UV, marca BW TEK, modelo BRC112E, el cual abarca las longitudes de onda específicas para el monitoreo de los contaminantes (150-450 nm), como son: ozono (O_3), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), ácido nitroso (HONO) y benceno (C_6H_6). Otros parámetros necesarios de medir para el análisis de datos, debido a la relación que presentan con la formación, transporte y precipitación de contaminantes, son las condiciones climatológicas.

El estudio se realizó en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, localizada en la Depresión Central de Chiapas, está compuesta por un valle y está limitada al sur

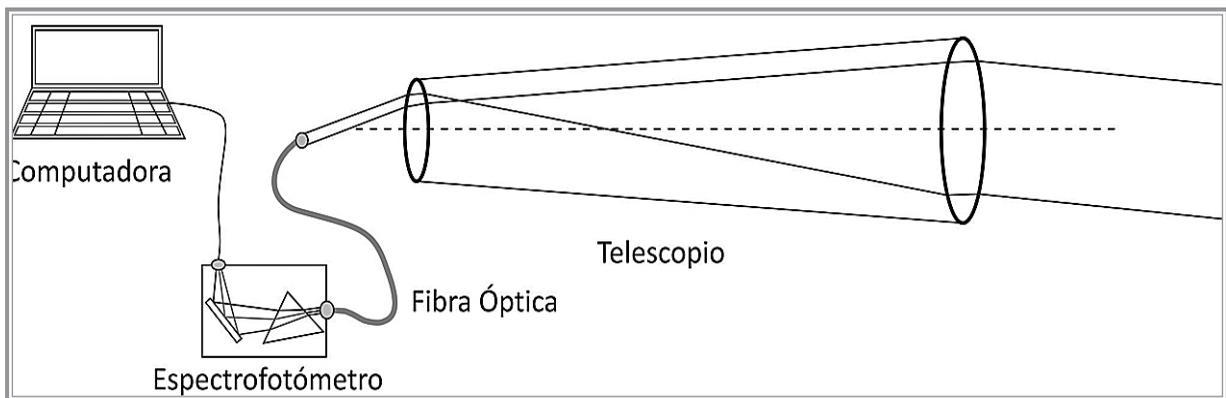


Figura 4 ■ | Arreglo experimental del sistema DOAS.

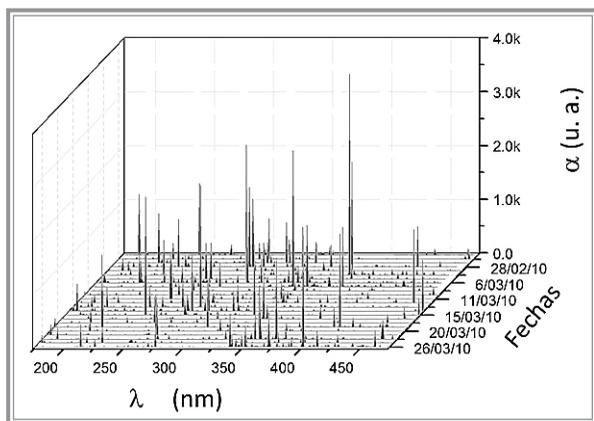


Figura 5 ■ | Espectro obtenido en en la zona centro de la ciudad a las 8 am.

y norte por dos elevaciones orográficas, en una de estas se encuentra la UNICACH y sitio de instalación del sistema DOAS, el sitio de estudio se determinó debido a la afluencia de automóviles, ubicado en la zona centro tomando como referencia un edificio a una distancia de la UNICACH de 2.93 km, con latitud $16^{\circ}45'14.38''N$, longitud: $93^{\circ}7'3.87''O$. Una vez definido el sitio se procedió a tomar la medición con el arreglo experimental mostrado en la figura 4, el cual está diseñado para detectar la señal emitida por la interacción de la energía (radiación solar), con la materia (contaminantes), usando como fuente de luz al sol.

El telescopio fue el instrumento utilizado para aislar la zona de estudio y permitió recolectar la luz que va desde el área de estudio a la estación de monitoreo, posteriormente esta información fue enviada a través de fibra óptica hasta el espectrofotómetro, el cual proporciona información del espectro de absorción y transmisión de los contaminantes. Estas mediciones se realizaron para calcular la razón de concentración según la ley de Beer-Lambert, teniendo la razón de intensidades se procedió a la localización de los diferentes contaminantes tomando como referencia sus secciones transversales, las cuales, como ya se mencionó, son características propias de cada especie a estudiar.

RESULTADOS

La zona de monitoreo propuesta fue elegida debido a la posición privilegiada de la UNICACH que permite un campo de visibilidad amplio de esa zona, la importancia del tránsito vehicular que tiene y a la forma característica de la ciudad en la que puede haber una mayor formación de contaminantes en la zona, si se presentan ciertas condiciones atmosféricas. El estudio se realizó del 15 de febrero al 26 de marzo de 2010 en tres diferentes horarios: 8 am, 12 pm y 3 pm, debido a que son horas en las que la hay un mayor índice de tráfico vehicular. Para el primer caso debido al inicio de actividades escolares y laborales, para el segundo (medio día) principalmente debido a actividad comercial que ahí se tiene y en el tercer horario debido al término de actividades laborales y escolares. El espectro obtenido a partir de las mediciones con el sistema DOAS, se presenta en la figura 5. Cabe señalar la obtención del espectro tomado directamente del cielo de manera perpendicular a la ubicación del sistema, lo anterior como espectro de referencia, haciendo la suposición de que en esta zona no existe una concentración de contaminantes considerable.

En la figura 5, se presenta la información obtenida del espectro de absorción medida en la trayectoria de análisis, representada por α , expresada en unidades arbitrarias (u. a.), en función de los días de muestreo y de la longitud de onda, expresada con λ , en nanómetros (nm), además se pueden observar los picos característicos correspondientes a los agentes contaminantes presentes en la zona de estudio, los cuales deben ser procesados y delimitados según su rango espectral para su estudio.

A partir de estos datos se procedió a la localización de las especies, que está en función de la longitud de onda (Platt, 2008). En la figura 6, se presenta el espectro obtenido el 13 de marzo a las 12 pm, en donde se enfatizan los rangos de longitudes de onda correspondientes a los contaminantes a evaluar, para el caso de O_3 , va desde 312 hasta 330 nm (Molina, 1986).

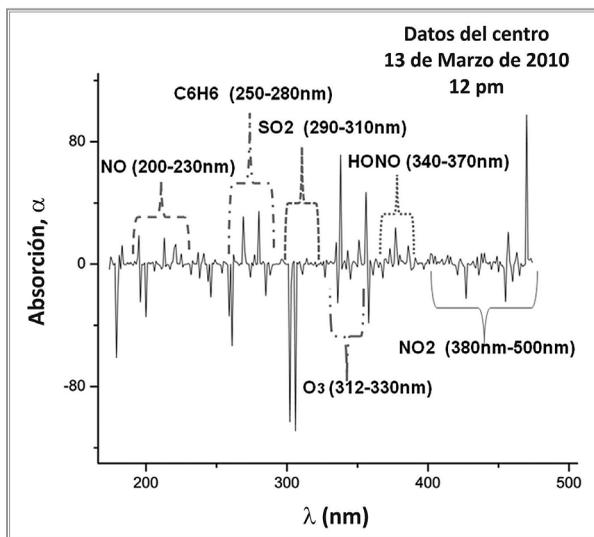


Figura 6 ■ | Delimitación espectral de los diferentes contaminantes, regiones UV-Vis.

Es importante señalar que los cambios evidentes en el espectro de absorción debido a la presencia de esta especie caen principalmente en este rango de longitudes de onda, para el SO_2 , va desde 290-310 nm (Chance, 2001), los picos de absorción correspondiente al benceno van desde 250 hasta 280 nm, para el HONO, abarca desde los 340 hasta los 370 nm (Chance, 2001), el NO va desde 200 hasta 230 nm y, la región espectral de absorción del NO_2 , abarca desde 380 hasta 500 nm (Brohede S., 2002).

Una vez delimitado el O_3 , se promediaron estos datos para determinar de esta manera los días de mayor discrepancia o error, el cual puede ser ocasionado por una mala alineación del sistema, por cuestiones climáticas, entre otros. Por lo anterior se deben buscar cuales son los parámetros que lo generan, por lo que se evaluaron las características climatológicas del sitio en los días de muestreo. Es importante señalar que el monitoreo se realizó en las instalaciones de la escuela de ingeniería ambiental de la UNICACH, por lo que se considera que la información es puntual, y se tendrá cierta incertidumbre en la correlación con los datos

del sistema propuesto, ya que este monitorea un camino óptico de aproximadamente 3 km, provocando que factores como velocidad del viento, humedad, temperatura, entre otros no sean iguales a aquellos presentes en la zona. Como ejemplo se deben observar edificios altos, que provocan pequeñas alteraciones en los patrones climáticos, además de que la información de referencia de los contaminantes presentes en la atmósfera son únicamente de la zona centro, particularmente en el palacio de gobierno, lugar en que la Secretaría de Medio Ambiente, Vivienda e Historia Natural (SEMAVIHN), tiene instalado un sistema de monitoreo.

Para el caso del viento, se observó que la variabilidad de este parámetro, puede presentar cambios en las condiciones de transporte de contaminantes, para el caso de vientos mayores a 2 m / s, generan movilidad de partículas suspendidas, lo que altera de manera considerable el área de análisis. Al evaluar la existencia de una relación directa de las condiciones climáticas con el sistema DOAS, no se observó influencia significativa en los resultados obtenidos, sin embargo es sabido que la combinación de estos generan características climatológicas muy particulares como son la presencia de bruma, nubosidad, entre otros. Como muestra de lo mencionado anteriormente, se ejemplifica la información obtenida el 6 de marzo, en donde se observó una temperatura de 21 grados centígrados, velocidad del viento de 1.8 m / s y una humedad relativa de 77 %, además de la condición de que el día estuvo nublado, lo que provocó una disminución de la visibilidad, provocando variaciones grandes en las mediciones del sistema.

Una vez analizado lo anterior, se realizó el promedio diario de los datos para el ozono y se comparó con la información proporcionada por la SEMAVIHN, para establecer la comparación de la información. Cabe señalar que en contraste con los experimentos de laboratorio, la repetición de mediciones realizadas en la práctica, bajo condiciones ambientales, es com-

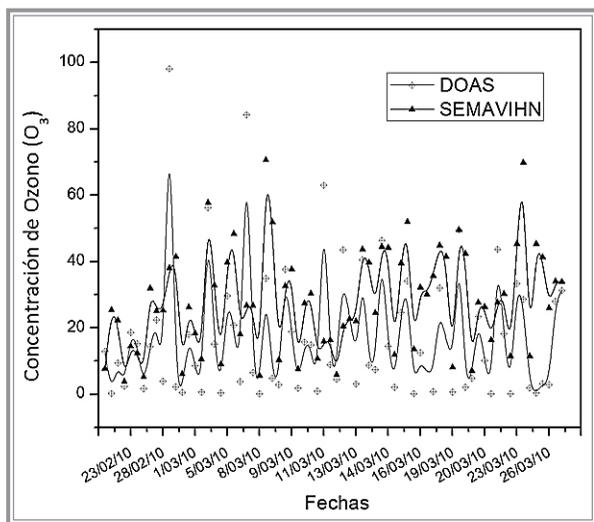


Figura 7 ■ Serie de tiempo de la concentración de O₃, medida con analizadores convencionales (SEMAVIHN) y el sistema DOAS, en horario matutino, zona centro.

plicada, ya que en particular para la técnica propuesta el medio de iluminación no es uniforme, aunado a las características propias del medio ambiente, por lo que los resultados presentados se basan en el comportamiento estadístico de las concentraciones medidas.

En el caso de ozono, el desempeño del equipo DOAS con respecto al analizador que utiliza el método de referencia evaluado en el horario matutino, se observó que existía una buena correlación. Aunque cabe señalar que para el caso de los datos correspondientes al 11 y 22 de marzo, se observaron variaciones respecto de los datos proporcionados por la SEMAVIHN, pero como se mencionó anteriormente, esto puede ser debido a que el sistema propuesto hace un barrido de la información a lo largo de una trayectoria, a diferencia del sistema de referencia que es puntual.

Para el mediodía, se observaron discrepancias principalmente en 4 fechas, el 23 de febrero, 6, 11 y 22 de marzo, donde se observó además la recurrencia en dos días de marzo, que como característica similar se tiene que fueron días en los que el viento fue superior a los

6 m / s, además de que para el caso del 11 de marzo fue el día con menor humedad relativa por la mañana.

Por último, para el horario vespertino, se observaron discrepancias el 28 de febrero, y 8, 19 y 26 de marzo, aquí no existe relación alguna con los datos presentados en los otros horarios, por lo que requiere del análisis de otros parámetros ambientales o del sistema propuesto para tener mayor certeza. Sin embargo la correlación de información es superior al 80%, tomando en cuenta todas las desventajas de un sistema pasivo, por lo que se considera una alternativa a considerar en el análisis de contaminantes.

CONCLUSIONES

Conforme a los resultados obtenidos en las mediciones realizadas se encuentra que existe cierta aproximación entre las mediciones con método convencional (puntual) y el DOAS (trayectoria). Las diferencias son debidas a la naturaleza misma de la medición por trayectoria (DOAS) y el puntual (convencional). Los resultados del análisis de desempeño entre ambas tecnologías indican que la medición de la calidad del aire (para el O₃) a través del sistema DOAS es confiable, el cual a su vez, puede ser utilizado para realizar una medición continua de diferentes contaminantes que incluye además hidrocarburos (benceno, tolueno, o,p,m, xileno, estireno y fenol), aunque lo anterior dependerá de la resolución del espectrofotómetro. El uso del DOAS (medición por trayectoria abierta) para el monitoreo de la calidad del aire tiene grandes ventajas sobre la técnica de medición *in situ*. Esto permite hacer estudios de emisiones bajo el concepto de medición por fuente de área, así como evaluaciones de la calidad del aire de manera más integral por cuenca atmosférica con límites de detección tan bajos como 1 ppb. El uso del sistema DOAS permite realizar mediciones en diferentes bandas del espectro de luz para detectar interferencias en la detección de ozono. Además los costos asociados a la operación y mantenimiento resultan moderados. Cabe señalar que

esta técnica fue posible de implementar debido a las características propias de la ciudad, la cual presenta temporadas largas de cielo despejado, que es cuando se puede observar el fenómeno de foto-disociación de gases emitidos por los automotores, ya que en días nublados, con demasiada presencia de neblina o con probabilidades de lluvia se incrementa el error considerablemente, por lo que es necesario el desarrollo y caracterización de la configuración DOAS activa.

AGRADECIMIENTOS

A la SEMAVIHN por su apoyo en la realización de esta investigación, facilitando información de contaminantes de la zona de estudio.

LITERATURA CITADA

- BAIRD, COLIN, 2001.** *Química ambiental*, Editorial Reverte, 2ª edición, pp. 4-607.
- SPIRO THOMAS, STIGLIANI WILLIAN, 2004.** *Química medioambiental*, Pearson Prentice Hall, pp. 219-243.
- CRESWELL, C.J., RUNQUIST, O.A. Y CAMPBELL, M.M., 1979.** *Análisis espectral de compuestos orgánicos*, Ed. Diana, México, s.p.
- MERCER CAROLYN, 2003.** *Optical metrology for fluids, combustion and solids*, s.l., s.e., 460 pp.
- HELMUT TELLE, GONZÁLEZ UREÑA ÁNGEL, DONOVAN ROBERT J., 2007.** *Laser chemistry: spectroscopy, dynamics and applications*, s.l., Ed. Wiley, 502 pp.
- STEDMAN D. H., 1989.** Automobile carbon monoxide emission, en *Environmental Science Technology*, 23(2), pp. 147-149.
- CHAN S. H., ET. AL., 1973.** Analysis of principles of remote sensing and characterization of stack gases by infrared spectroscopy, en *Environmental Science Technology*, 7(5), pp. 424-427.
- BARREFORS G., 1997.** Erratum to monitoring benzene, toluene, and p-xylene in urban air with differential optical absorption spectroscopy technique, en *Science Tot. Environment*, 196, 99-104.
- CROOKELL ANDREW, BROOK RICHARD, 2001.** Remote optical measurement techniques: under-performance or over-expectation?, en *Proceeding of SPIE*, 4199, 149-156.
- PATTERSON B. A., ET. AL., 1998.** Detection of benzene and other gases with an open-path, static Fourier transform UV spectrometer, en *Applied Optics*, 37(15), 3172-3175.
- BAUM M, ET. AL., 2000.** *Multicomponent remote sensing of vehicle exhaust emissions by dispersive IR and UV spectroscopy*, Proceeding of SPIE, 45th annual meeting, august 2000, San Diego, CA., s.p.
- BISHOP G. A. AND STEDMAN D. H., 1996.** Measuring the emissions of passing cars, en *Acc. Chem. Res.* 29, 489-495.

SKOOG D. A., HOLLER J. H., NIEMAN, 2000. *Principios de análisis instrumental*, 5a. edición, Ed. McGraw-Hill, pp. 122-407.

GRUTTER MICHEL Y BASALDUD ROBERTO, 2006. *Técnicas ópticas de percepción remota para la caracterización de gases atmosféricos. Contaminación atmosférica V*, El Colegio Nacional, ISBN 970-640-303-5, pp. 91-117

PLATT, U., 2008. *Modern methods of the measurement of atmospheric trace gases*, Chem Phys 1999, 1:5409–15.

MOLINA L. T., MOLINA M. J., 1986. Absolute absorption cross sections of ozone in the 185- to 350-nm wavelength range, en *J Geophys Res D*, 91:14501–8.

CHANCE K. V., BURROWS J. P., PERNER D., 2001, Schneider W. Satellite measurements of atmospheric ozone profiles, including tropospheric ozone, from UV/visible measurements in the nadir geometry: a potential method to retrieve tropospheric ozone, *JQSRT*, 57:467–76.

BROHEDE S., 2002. *DOAS–Differential Optical Absorption Spectroscopy- Department of Radio and Space Science*, University of Chalmers, Suecia, s.p.

