

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE OZONO EN LA CIUDAD DE MARACAIBO, ESTADO ZULIA, VENEZUELA

Yulixis Nohemi CANO BAUDINO*, José Agustín MORALES MARIÑO,
Ligbel Josefina SÁNCHEZ CASTILLO, Marinela Nazareth COLINA RINCÓN y
Julio César TORRES PUENTE

Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia. Apartado postal 15197, Maracaibo 4005, Venezuela
* Autor para correspondencia: yulixiscano@gmail.com

(Recibido agosto 2014; aceptado junio 2015)

Palabras clave: contaminación atmosférica, ozono troposférico, oxidante fotoquímico

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron los niveles de ozono en un sitio de la zona noroeste de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. Las muestras se recolectaron *in situ* a través de un fotómetro Modelo 400A durante el periodo de enero a diciembre de 2009, por 24 h continuas (n = 338). El ciclo fotoquímico del ozono exhibió un comportamiento característico de zonas urbanas, con valores mínimos a tempranas horas de la mañana. A partir de las 8 am se observó un incremento con valores máximos alrededor del mediodía. Por la tarde se redujeron las concentraciones de ozono, valores muy bajos se registraron durante la noche. Los valores máximos de ozono se reportaron en la época seca, mientras que los valores más bajos fueron en la época lluviosa. El análisis estadístico reveló que existen diferencias significativas ($p < 0.01$) entre las concentraciones promedio encontradas durante los dos periodos. Las concentraciones máximas horarias de ozono no excedieron el estándar nacional de calidad de aire ($240 \text{ mg/m}^3/\text{h}$) en los días evaluados, pero el valor máximo por hora fue de 227 mg/m^3 (aproximadamente 95 % del estándar).

Key words: air pollution, photochemical oxidant, tropospheric ozone

ABSTRACT

This study evaluated the ozone levels on a site in the Northwest area of the city of Maracaibo, Venezuela. Samples were collected *in situ* using a photometer Model 400A from January to December 2009, for 24 continuous hours (n = 338). The photochemical ozone cycle exhibited a behavior characteristic of urban areas, with minimum values in the early hours of the morning. From 8 am there was an increase of ozone concentration, obtaining maximum values around noon. In the afternoon there was a decrease of those concentrations, with very low values during the night. The maximum ozone records were reported in the dry and rainy season where concentrations were lower. Statistical analysis showed that there were significant differences ($p < 0.01$) between average concentrations found during both periods. Hourly maximum ozone concentrations did not exceed the national air quality standard ($240 \text{ } \mu\text{g/m}^3/\text{h}$) on any of the days evaluated, but the maximum value per hour was $227 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (approximately 95 % of the standard).

INTRODUCCIÓN

El ozono (O_3) juega un papel muy complejo en la calidad del aire, la química atmosférica y el clima. En este último participa directamente como un gas de efecto invernadero e indirectamente a través del ciclo del carbono (Calesso *et al.* 2009). Según Beltman *et al.* (2013) y Nawahda *et al.* (2013) el aumento de los niveles de O_3 , especialmente durante episodios en el verano, tiene un efecto negativo en las personas, los animales y la vegetación (Han 2013). La exposición a altas concentraciones de O_3 puede provocar problemas respiratorios y cardiovasculares, además posiblemente puede conducir a muertes prematuras (Bowman 2013, Malmqvist 2014). Durante los últimos siglos los niveles de O_3 han aumentado como resultado de las actividades humana. Dichos niveles dependen tanto de los efectos naturales como de los procesos antrópicos (Asif *et al.* 2014).

En términos cuantitativos los oxidantes más importantes son el O_3 y los peróxidos (de hidrógeno y orgánicos), ambos se consideran indicadores de la calidad del aire. Pabón *et al.* (2001) y Tong *et al.* (2011) han indicado que estos contaminantes son los principales responsables de la oxidación de compuestos que contribuyen con la formación del smog fotoquímico y lluvia ácida, entre otros, que causan deterioro a los ecosistemas acuáticos y terrestres. Además el O_3 es considerado como el compuesto iniciador de muchos de los procesos de oxidación en la troposfera, ya que produce radicales hidroxil (OH) e hidroxilperoxi (HO_2) que son especies altamente oxidantes y que se forman por acción de la radiación UV con el O_3 y el vapor de agua.

En América Latina hasta el momento, no existen acuerdos regionales sobre contaminación atmosférica, aunque algunas iniciativas internacionales apuntan en esa dirección. De allí la importancia de evaluar la tendencia (variación en el tiempo) de los contaminantes atmosféricos que servirá de soporte para la implementación de controles que garanticen la calidad del aire que respiramos. A pesar de que las muestras fueron recolectadas en el año 2009 es importante destacar que por primera vez en Maracaibo (entidad con mayor población en el Estado Zulia, Venezuela) se realizó simultáneamente la recolección de O_3 y mediciones de las variables meteorológicas en el sitio de monitoreo ambiental. Además existe muy poca información sobre este contaminante en la ciudad. Con estos antecedentes, los objetivos del trabajo fueron cuantificar los niveles de O_3 *in situ* durante el año 2009, evaluar el ciclo diurno de la variación en la concentración de O_3 y determinar los niveles de

contaminación atmosférica por O_3 en función de los estándares de calidad del aire establecidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de recolección de muestras

Como se muestra la **figura 1**, la ciudad de Maracaibo se encuentra situada geográficamente en la costa occidental del Lago de Maracaibo, Venezuela, entre las siguientes coordenadas: $10^{\circ}31'$ - $10^{\circ}46'$ de latitud norte y $71^{\circ}35'$ - $71^{\circ}97'$ de longitud oeste. López *et al.* (2010) propuso que debido a la ubicación de la cuenca del lago de Maracaibo, la ciudad se ve afectada por varios fenómenos climáticos mundiales y regionales como El Niño - Oscilación Sur, la zona de convergencia intertropical (ZCIT), las migraciones, las intrusiones de la alta troposfera, las perturbaciones sinópticas, entre otros. Adicionalmente a nivel local, la circulación de los vientos y la actividad de convección sobre la ciudad se definen por las barreras geográficas, la influencia de los vientos alisios, las brisas del lago y la oclusión entre las masas de aire frío procedente de las Cordilleras de los Andes y de Perijá y las masas de aire cálido procedente del lago de Maracaibo y del Mar Caribe (Muñoz y Díaz 2001, Cano 2012). El régimen anual de lluvias presenta dos máximos y dos mínimos. La época lluviosa se extiende desde abril - mayo hasta noviembre y exhibe una distribución bimodal con máximos en mayo, septiembre - octubre y un mínimo en julio (Velásquez 2003). Por consiguiente, la época seca abarca los meses desde diciembre hasta marzo - abril.

La ciudad de Maracaibo tiene una población de aproximadamente 1.6 millones de habitantes (INE 2014) y una superficie de 1543 km^2 (**Fig. 1**). Además de las emisiones provenientes del tráfico automotor de la ciudad, se han identificado otras posibles fuentes de emisiones antrópicas vientos arriba de la zona como el complejo petroquímico El Tablazo, emisiones locales de industrias medianas (planta de cemento y termoeléctrica) y fuentes foráneas como las refinerías de Amuay y Cardón, y probablemente las de Aruba y Curazao. La dirección predominante de los vientos es norte-noreste (NNE) con una velocidad promedio de 3.8 m/s .

Recolección de muestras

Para la recolección y mediciones de O_3 *in situ* se empleó un fotómetro Modelo 400A (Marca Teledyne). El principio de operación de este equipo automático se basó en la absorción característica de

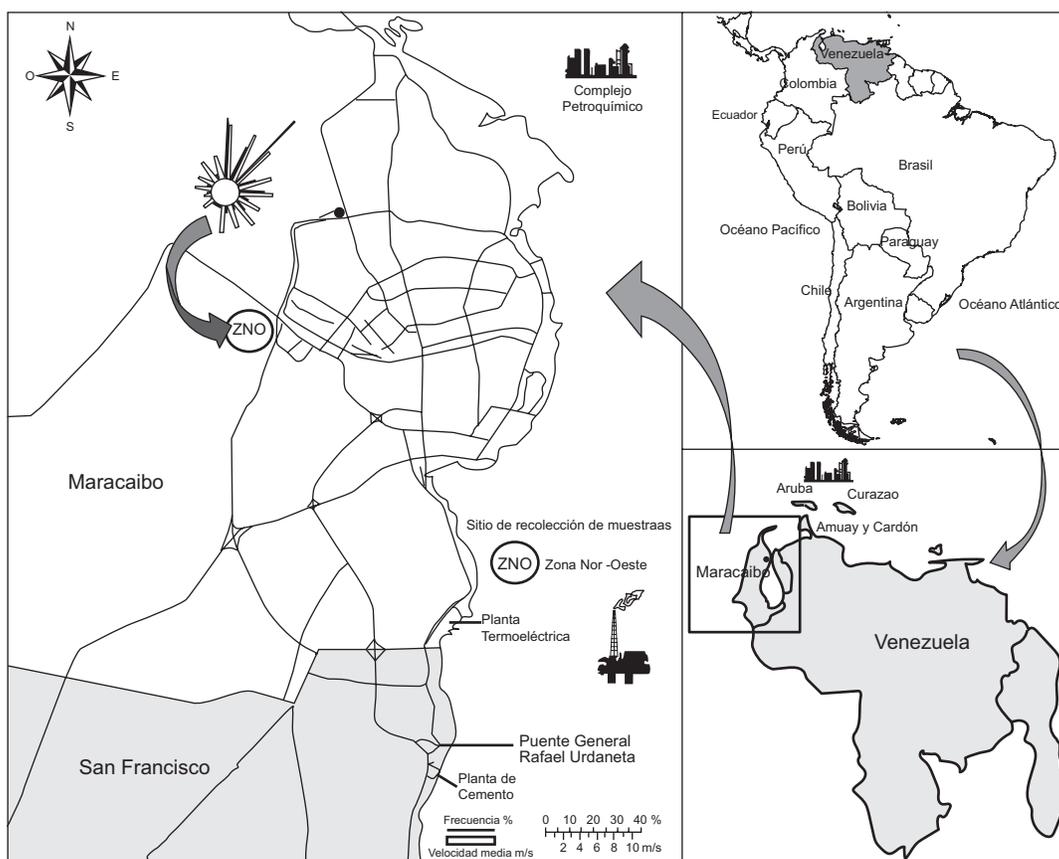


Fig. 1. Mapa de Venezuela y Maracaibo que muestra el sitio de recolección de muestras de ozono troposférico en la zona noroeste (ZNO) de la ciudad

la molécula de O_3 cuando es irradiada por luz ultravioleta (UV). Cuando el haz de esta luz atraviesa un cierto volumen de gas que contiene moléculas de O_3 se produce una absorción de la radiación UV por las mismas moléculas. La absorción es máxima para longitudes de onda de alrededor de 250 nm. El límite de detección fue de 2 ppb con un tiempo de respuesta de 10 seg. Para el cálculo de las concentraciones de ozono en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se utilizó la siguiente ecuación:

$$[O_3] \text{ ppb} \times 2.14 = [O_3] \mu\text{g}/\text{m}^3$$

de donde:

$$[O_3] \text{ ppb} = \text{concentración de } O_3 \text{ en ppb obtenida del equipo}$$

$$[O_3] \mu\text{g}/\text{m}^3 = \text{concentración de } O_3 \text{ en } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$2.14 = \text{factor de conversión para expresar el volumen de aire en } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Se seleccionó un sitio de recolección de muestras a una altura de 5.8 m ubicado en la parte noroeste de

la ciudad en una zona residencial entre las Avenidas La Limpia y Circunvalación 2, con alta densidad vehicular ($10^{\circ}40'1''$ de latitud norte y $71^{\circ}38'26''$ de longitud oeste). Las determinaciones de O_3 se realizaron en forma continua durante las 24 horas del día, con valores de O_3 por hora durante los meses de enero a junio de 2009 ($n = 338$ días). El promedio del estándar primario (\pm desviación estándar) fue 400.1 ± 0.76 ppb, con un porcentaje de error menor al 1 %. Al compararlo con el valor teórico (400 ppb) se observó un error menor al 0.1 %, lo que permitió garantizar que los resultados obtenidos son confiables y que el método de recolección así como el análisis de muestra fue adecuado.

RESULTADOS

Variación horaria anual y mensual

En la **figura 2** se muestra el ciclo diario de las concentraciones promedio horarias de O_3 determinadas durante el periodo de estudio (enero - diciembre 2009).

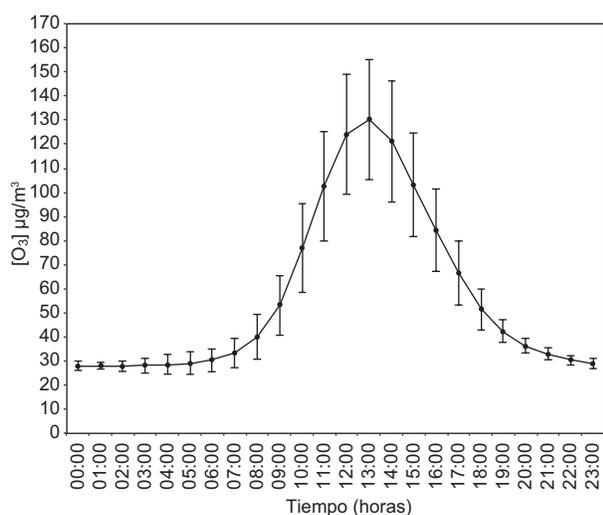


Fig. 2. Variación anual de los valores promedio por hora de las concentraciones de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los meses enero a diciembre 2009 ($n = 338$ días; DE = Desviación Estándar)

Los promedios horarios se calcularon a partir de los valores horarios de los días evaluados ($n = 338$).

En la **figura 3** se muestran los promedios mensuales de las concentraciones diarias de O_3 evaluadas durante enero a diciembre de 2009 ($n = 338$ días). Como se puede observar, en todos los meses las concentraciones de O_3 presentan el mismo comportamiento de variación a lo largo del día, las detectadas a las primeras horas de la mañana son bajas y se

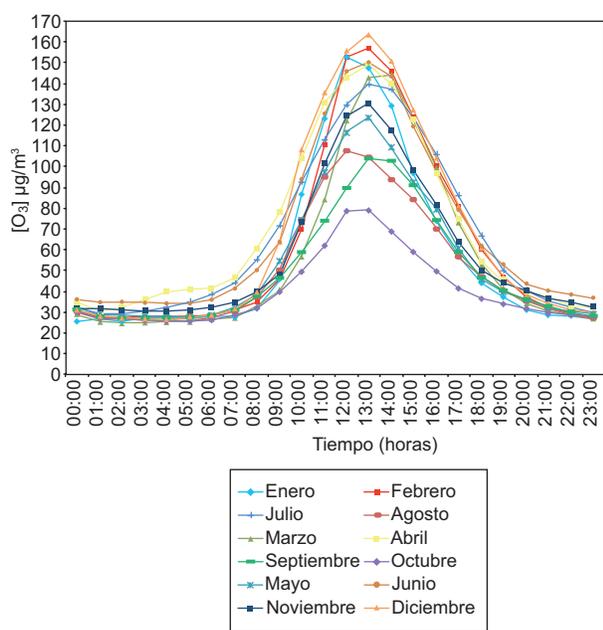


Fig. 3. Variación mensual de las concentraciones promedio por hora de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los meses enero a diciembre 2009 ($n = 338$ días)

incrementan a medida que transcurre el día debido al aumento diurno de la temperatura y a la radiación solar.

Los valores máximos de O_3 se observaron alrededor del mediodía, es a estas horas del día que se registran los valores máximos de radiación UV y de temperatura, lo cual favorece los diferentes procesos fotoquímicos de formación del O_3 . Lo anterior coincide con el estudio realizado por Fernández *et al.* (2011).

Variación estacional

El ciclo anual de los niveles de ozono en la zona noroeste de la ciudad de Maracaibo se caracterizó por presentar dos periodos relacionados con las estaciones (seca y lluviosa) en Venezuela. El primer periodo ocurre de diciembre a abril, denominado época seca y el segundo abarca los meses de mayo a noviembre, denominado época lluviosa (Velásquez 2003, Sena 2006).

Las concentraciones de O_3 describen un ciclo anual. Durante los meses de enero a abril y diciembre se presentan los valores máximos de concentración de este contaminante, con un valor máximo anual en el mes de diciembre ($130.0 \pm 28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los niveles promedios mensuales de O_3 más bajos se obtienen durante los meses mayo a noviembre (**Fig. 3**), el mínimo anual se registró en el mes de octubre ($61.0 \pm 13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las concentraciones de O_3 presentan un ciclo estacional, como se corrobora al evaluar los resultados mostrados en el **cuadro I**. El análisis estadístico reveló que existen diferencias significativas ($p < 0.01$) entre las concentraciones promedio encontradas durante las dos épocas, lo que indica que las concentraciones máximas de O_3 son significativamente más altas en la época seca.

Influencias de las variables meteorológicas

En la **figura 4** se realizó la comparación entre las concentraciones de ozono y las variables meteorológicas (índice de radiación UV, temperatura, velocidad de viento y % de humedad relativa).

La comparación de las concentraciones por hora de O_3 con la radiación UV (**Fig. 4a**) presentó una correlación significativa ($r = 0.97$; $p < 0.01$), lo cual es congruente con lo esperado, debido a que el O_3 es un contaminante secundario de origen fotoquímico y por tanto la radiación solar favorece su formación. Además se observa un decrecimiento de las concentraciones del mismo en horas de la tarde, debido a la disminución de la intensidad de radiación solar y a una mayor inestabilidad de la capa de mezcla.

CUADRO I. VALORES PROMEDIO (MÁXIMO DIARIO DE 8 H), DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE) E INTERVALOS DE LAS CONCENTRACIONES DE O₃ (µg/m³) EN LA ÉPOCA SECA, LLUVIOSA Y ANUAL PARA 2009

| | Promedio ± DE | n* | Intervalo (mínimo - máximo) |
|----------------|---------------|-----|-----------------------------|
| Época seca | 116.7 ± 8.99 | 124 | 24.7 – 157.2 |
| Época lluviosa | 90.3 ± 17.8 | 214 | 25.7 – 139.8 |
| Anual | 101.3 ± 19.7 | 338 | 24.7 – 157.2 |

* n = Número de días evaluados

Al evaluar el efecto que ejerce la temperatura sobre las concentraciones de O₃, se encontró una correlación significativa entre los niveles de O₃ y la temperatura en la ciudad ($r = 0.87$; $p < 0.01$; **Fig. 4b**), lo cual sugiere que el aumento de la temperatura durante el día favorece la cinética de formación del O₃. Es importante señalar que en las primeras horas de la mañana se inicia un incremento en las emisiones de los gases precursores (NO_x, VOC's, CO, etc.) importantes en la formación del O₃, provenientes de los vehículos automotores debido a una mayor circulación de los mismos a partir de estas horas (USA EPA 2011).

Otro de los parámetros meteorológicos considerado fue la humedad relativa (% HR). En la **figura 4c** se compararon los niveles de O₃ con % HR. En esta figura se observa que existe una correlación inversa significativa ($r = - 0.94$; $p < 0.01$), que pudo ser debida a que uno de los procesos de destrucción del O₃ troposférico es la reacción que tiene con el H₂O para la formación de radicales hidroxil (OH) e hidroxilperoxi (HO₂) altamente oxidantes. Lo anterior ratifica el papel del O₃ sobre los procesos de oxidación en la atmósfera (Wallace y Hobbs 2006, USA EPA 2011), un comportamiento similar fue observado por Blanchard *et al.* (2010) y por Tong *et al.* (2011).

Por otro lado, es importante el análisis del régimen de viento existente en una zona determinada debido a que aporta información sobre fenómenos atmosféricos como transporte, difusión y dispersión de contaminantes. En este estudio se compararon las concentraciones de O₃ y la velocidad del viento (Vv), se obtuvo una correlación inversa significativa ($r = - 0.75$; $p < 0.01$) a partir de las 11 am, lo que indica que con el incremento en la velocidad del viento existe una tendencia hacia la disminución de las concentraciones del O₃ (**Fig. 4d**). Generalmente las velocidades del viento bajas se asocian con una atmósfera estable, lo que implica condiciones meteorológicas propicias para la acumulación de los

precursores fotoquímicos del O₃ troposférico y por ende se favorece su formación.

Calidad del aire

En la **figura 5** se presentan los valores máximos horarios por día durante los meses de enero a diciembre de 2009, en ninguno de los días evaluados se excede el estándar horario de calidad de una hora establecido para Venezuela (240 µg/m³) y reportados en el Decreto 638 (COVENIN 1985).

De los 338 días evaluados, el valor máximo de concentración fue 227 µg/m³, lo que sugiere que no hay problemas de contaminación por O₃ troposférico en la ciudad de Maracaibo durante el periodo de estudio. Sin embargo, es importante realizar un monitoreo continuo del contaminante debido a que existen valores muy cercanos (aproximadamente 95 %) al valor máximo permitido.

Por otro lado, los niveles bajos de concentración de O₃ pueden ser debidos en parte a factores que favorecen la dispersión de los contaminantes en la zona de estudio como la velocidad del viento (3.8 ± 0.9 m/s) y la topografía plana sin barreras geográficas importantes, además de los procesos fotoquímicos de destrucción del O₃ en la atmósfera.

Comparación de las concentraciones de O₃ con otras zonas de Venezuela y el mundo

Se realizó una comparación de las concentraciones de O₃ de este estudio con los valores de zonas urbanas y rurales de diferentes lugares de Venezuela y el mundo. Los niveles de O₃ reportados para zonas urbanas de países como Colombia (Toro *et al.* 2006), Chile (Gramsh *et al.* 2006), China (Chang y Yao 2008), México (García *et al.* 2009) y EUA, específicamente Boston (Kang *et al.* 2014) son aproximadamente de 3 a 4 veces más altos que los encontrados en este trabajo (Cuadro II). En este cuadro también se puede observar que los valores en Maracaibo son similares a los encontrados en Catia La Mar, Venezuela (Donoso *et al.* 2006),

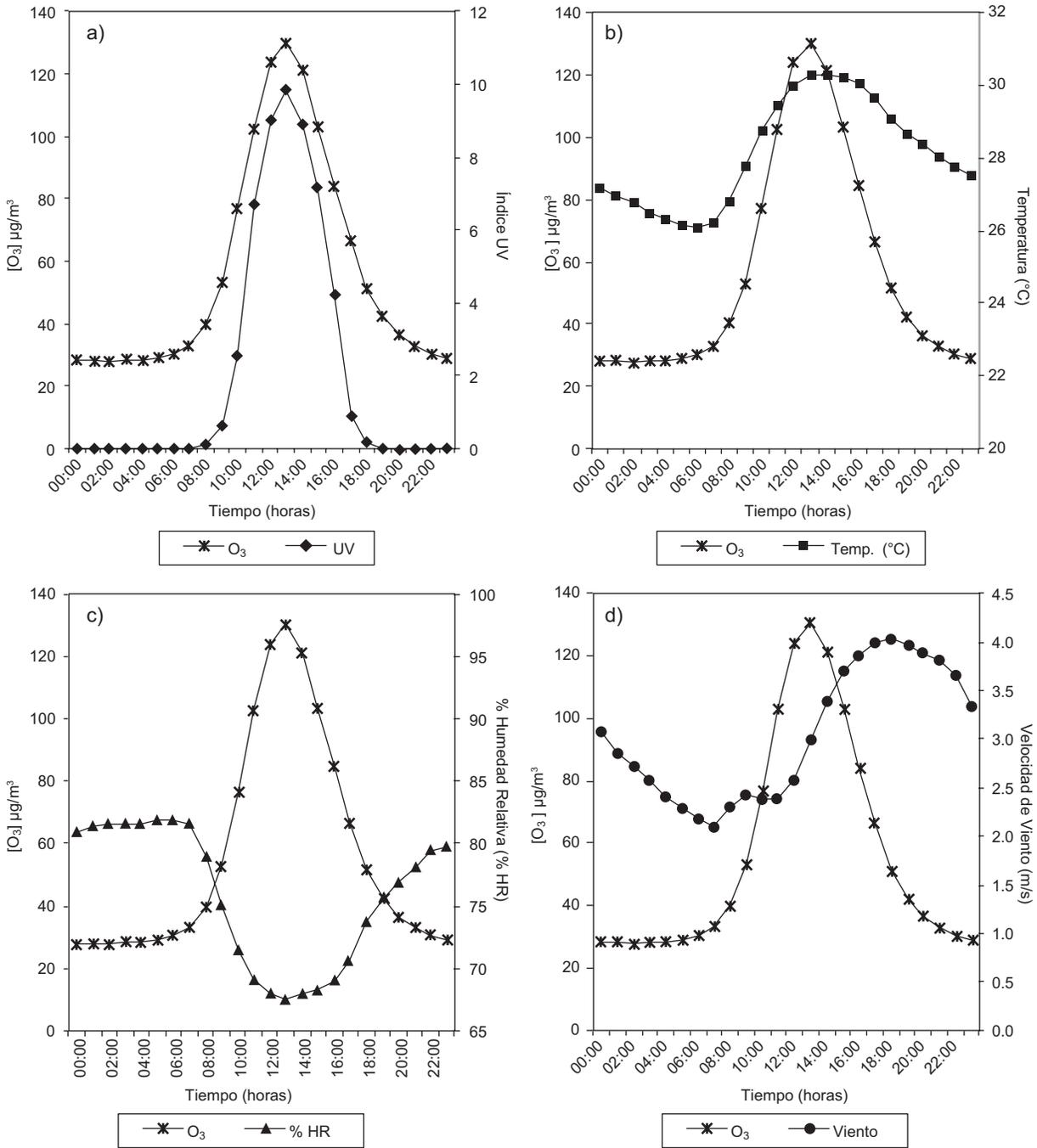


Fig. 4. Comparación de los valores promedio por hora de las concentraciones de O₃ (mg/m³): a) Índice de radiación UV, b) Temperatura (°C), c) Humedad relativa (% HR) y d) Velocidad de viento (Vv, m/s) para los meses enero - diciembre 2009 (n = 338 días) en la zona noroeste de Maracaibo, Venezuela

en Agra, India (Singla *et al.* 2011), en Atlanta, EUA (Blanchard *et al.* 2010) y en Malmö y Umeå, Suecia (Malmqvist *et al.* 2014).

Los valores en las concentraciones de O₃ en este trabajo son un poco más elevados que los reportados por Sena (2006) en Maracaibo para años

anteriores (**Cuadro II**). Este incremento se puede deber al aumento del tráfico vehicular, aunado al hecho de que existe un mayor deterioro y pocos controles de contaminación en estos automóviles. Asimismo, hay una mayor densidad poblacional con la que se podrían estar emitiendo en mayor

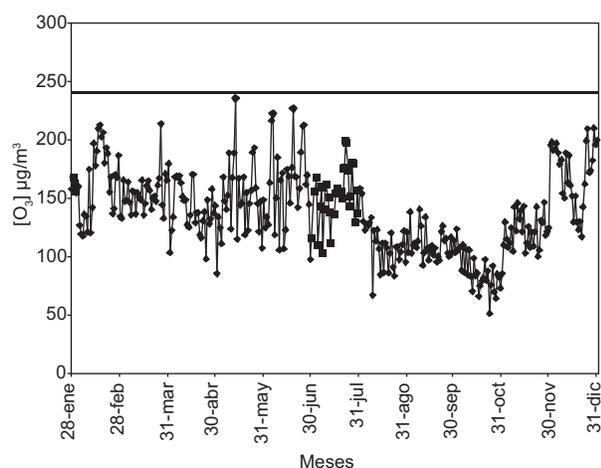


Fig. 5. Valores máximos diarios de las concentraciones de O₃ de enero a diciembre de 2009 (n = 338 días) en la zona noroeste de la ciudad de Maracaibo

proporción los precursores de este contaminante secundario.

También se observa en el **cuadro II** que las concentraciones en Maracaibo son más altas (alrededor de 2 veces) que las determinadas por Sanhueza *et al.* (1999 y 2005) en La Gran Sabana - Auyantepuy - Canaima (Venezuela), por Villanueva *et al.* (2014) en Castilla (España) y por Whan *et al.* (2013) en Gucheng (China), zonas rurales influenciadas principalmente por emisiones biogénicas, quemas de vegetación y emisiones regionales de zonas urbanas.

COMENTARIOS

Calesso *et al.* (2009) y Tong *et al.* (2011) han reportado en términos generales, que la evolución de los niveles de O₃ a lo largo del día está condicionada por tres factores principales: la topografía de la zona, las condiciones meteorológicas existentes y las emisiones directas producidas en el entorno. La variación de los niveles de este gas contaminante a lo largo del día se ajusta al ciclo diario de formación y destrucción del O₃ descrito como típico para zonas urbanas.

En los meses correspondientes a la época seca, los procesos que conducen a la formación fotoquímica del O₃ a partir de sus precursores aumentan su eficiencia durante el intervalo de horas alrededor del mediodía. Lo anterior debido a que durante este periodo se registran los máximos valores de temperatura y de radiación UV, por lo tanto en dicho intervalo, se alcanzan las mayores concentraciones de O₃.

La temperatura es una de las variables meteorológicas que mayor influencia ejerce sobre los niveles de los contaminantes de origen fotoquímico, debido a que:

- Ulaş *et al.* (2006) sugieren que la temperatura influye en la velocidad de las reacciones fotoquímicas que conducen a la formación de O₃ superficial a partir de sus precursores.
- López *et al.* (2008) y Oookaa *et al.* (2011) demostraron que existe una relación directa entre la

CUADRO II. VALORES DE CONCENTRACIONES (MÁXIMO DIARIO DE 8 h) DE O₃ (µg/m³) OBSERVADAS EN DIFERENTES LUGARES DE VENEZUELA Y EL MUNDO

| Lugar | Ciudad (país) | Periodo | Promedio | Referencia |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------|
| Urbano | Maracaibo (Venezuela) | 2009 | 101.3 | Presente estudio |
| | Maracaibo (Venezuela) | 1997 - 2005 | 96.3 | Sena (2006) |
| | Catia La Mar (Venezuela) | 2005 | 102.7 | Donoso <i>et al.</i> (2006) |
| | Valle de Aburra (Colombia) | 1999 | 335.9 | Toro <i>et al.</i> (2006) |
| | Santiago (Chile) | 1994 - 1995 | 273.0 | Gramsh <i>et al.</i> (2006) |
| | Beijin (China) | 2001-2004 | 349.3 | Chang y Yaoa (2008) |
| | Ciudad de México (México) | 2007 | 299.6 | García <i>et al.</i> (2009) |
| | Atlanta (EUA) | 1988 - 2007 | 140.8 | Blanchard <i>et al.</i> (2010) |
| | Agra (India) | 2008 - 2009 | 92.0 | Singla <i>et al.</i> (2011) |
| | Malmö (Suecia) | 2012 | 54.9 | Malmqvist <i>et al.</i> (2014) |
| | Umeå (Suecia) | 2012 | 69.1 | Malmqvist <i>et al.</i> (2014) |
| | Boston (EUA) | 2002 y 2010 | 240.8 | Kan <i>et al.</i> (2014) |
| | Rural | Auyantepuy (Venezuela) | 1994 | 37.9 |
| Canaima (Venezuela) | | 1994 | 30.2 | Sanhueza <i>et al.</i> (1999) |
| Parupa, La Gran Sabana, (Venezuela) | | 1998 - 2003 | 38.0 | Sanhueza <i>et al.</i> (2005) |
| Osma (Venezuela) | | 2005 | 70.6 | Donoso <i>et al.</i> (2006) |
| Gucheng (China) | | 2009 - 2010 | 54.3 | Whan <i>et al.</i> (2013) |
| Castilla (España) | | 2010 - 2011 | 56.9 | Villanueva <i>et al.</i> (2014) |

temperatura y el aumento de las tasas de emisión de precursores volátiles del O₃ como son los aldehídos, formaldehído, metanol, etc.

- c) Fernández *et al.* (2011) indicaron que un aumento en la temperatura implica la disminución del % HR lo que favorece la formación del O₃, ya que esta variable participa en diferentes reacciones de destrucción del O₃.
- d) Ookaa *et al.* (2011) propusieron que la variabilidad de las concentraciones de O₃ diarias depende de las condiciones meteorológicas y del grado de mezcla existente entre los contaminantes precursores desde que éstos son emitidos.

CONCLUSIONES

En el ciclo diurno del O₃ se registró una producción significativa a partir de las 8:00 am, con valores máximos alrededor del mediodía. Posteriormente se observó un consumo del mismo hasta las 19:00 h debido a los diferentes procesos fotoquímicos de producción-destrucción vía radical libre en presencia de vapor de agua. Además, se observó un ciclo estacional en las concentraciones de O₃, con registros máximos en la época seca y mínimos en la lluviosa.

Las concentraciones de O₃ describieron un ciclo anual, con valores máximos durante los meses de enero a abril y diciembre (valor máximo anual en el mes de diciembre) durante la época seca y los promedios más bajos durante los meses mayo a noviembre (mínimo anual en el mes de octubre), durante la época lluviosa.

Del estudio realizado de la relación entre las concentraciones de O₃ y las variables meteorológicas se puede decir que la radiación UV y la temperatura favorecen las reacciones fotoquímicas que conducen a la formación de este contaminante secundario. El % HR participa en las reacciones de destrucción química del O₃. La velocidad de viento, ejerció un efecto de dilución o dispersión atmosférica tanto de las concentraciones del contaminante como de sus precursores.

Las concentraciones máximas diarias de O₃ por hora observadas durante el periodo en estudio no sobrepasaron el estándar de calidad de aire de una hora establecido para Venezuela. De los 338 días evaluados, el valor máximo de una hora fue de 227 µg/m³, el cual representó aproximadamente un 95 % del valor máximo permitido.

Los niveles de O₃ en Maracaibo fueron mucho menores (aproximadamente 3 veces más bajos) que

los reportados en diferentes áreas urbanas del mundo con mayor grado de desarrollo industrial y más altos (alrededor de 3 veces) que los encontrados en áreas de poca influencia antrópica. Al comprar las concentraciones de O₃ reportadas en años anteriores en Maracaibo, éstas presentaron una tendencia a incrementarse.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad del Zulia (CONDES-LUZ) por el financiamiento de esta investigación.

REFERENCIAS

- Asif M., Kim K., Shon Z., Sohn J., Jeon E., Kim Y. y Min J. (2014). Comparison of ozone pollution levels at various sites in Seoul, a megacity in Northeast Asia. *Atmos. Res.* 138, 330-345.
- Beltman J., Hendriks C., Tumb M. y Schaap M. (2013). The impact of large scale biomass production on ozone air pollution in Europe. *Atmos. Environ.* 71, 352-363.
- Blanchard C., Hidy G. y Tanenbaum S. (2010). NMOC, ozone, and organic aerosol in the southeastern United States, 1999 - 2007: 2. Ozone trends and sensitivity to NMOC emissions in Atlanta, Georgia. *Atmos. Environ.* 44, 4840-4849
- Bowman K. (2013). Toward the next generation of air quality monitoring: Ozone. *Atmos. Environ.* 80, 571-583.
- Calesso E., Ramos E., Wiegand F. y Fachel J. (2009). Measurement of surface ozone and its precursors in an urban area in South Brazil. *Atmos. Environ.* 43, 2213-2220.
- Chang C. y Yao X. (2008). Review Air pollution in mega cities in China *Atmos. Environ.* 42, 1-42.
- Cano Y. (2012) Estudio sobre los niveles de Ozono, PM₁₀, PM_{2,5} y la composición de los iones solubles en la atmósfera de Maracaibo. Tesis Doctoral. Facultad Experimental de Ciencias. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 176 pp.
- COVENIN (1985). Normas venezolanas de calidad del aire y control de la contaminación atmosférica. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Decreto N° 638. Venezuela. 26 de abril de 1995.
- Donoso L., Alvarado J., Rojas A. y Pérez T. (2006). Relaciones entre ozono y monóxido de carbono en diferentes sitios del litoral central de Venezuela. Memorias. IV Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Cáceres, España. 22-26 mayo 2006. CD-ROM.

- Fernández M., Gallego M., García J. y Acero F. (2011). A study of surface ozone variability over the Iberian Peninsula during the last fifty years. *Atmos. Environ.* 45, 1946-1959.
- García A., Jazcilevich A., Ruiz L., Torres R, Suárez M. y Reséndiz A. (2009). Ozone weekend effect analysis in Mexico City. *Atmósfera* 22, 281-297.
- Gramsh E., Cereceda-Balic F., Oyola P. y Von Baer D. (2006). Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and ozone data. *Atmos. Environ.* 40, 5464-5475.
- Han S., Zhang M., Zhao C., Lu X., Ran L., Han M., Li P. y Li X. (2013). Differences in ozone photochemical characteristics between the megacity Tianjin and its rural surroundings. *Atmos. Environ.* 79, 209-216.
- INE (2011). Censo del Municipio Maracaibo demografía y distribución poblacional. Instituto Nacional de Estadística (INE) [en línea]. <http://www.redatam.ine.gov.ve/redatam/index.html> 16/08/2014.
- Kang C., Gold D. y Koutrakis P. (2014). Downwind O₃ and PM_{2.5} speciation during the wildfires in 2002 and 2010. *Atmos. Environ.* 95, 511-519.
- López J., Andressen R. y Lugo A. (2010). Patrones de vientos troposféricos en la cuenca del lago de Maracaibo, Venezuela. *Terra* 39, 13-30.
- López E., García M., Peral N., Ballester F. e Iñiguez C. (2008). Caracterización del ambiente atmosférico en Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife. *Revista Española Salud Pública* 82, 493-507.
- Malmqvist E., Olsson D., Hagenbjörk-Gustafsson A., Forsberg B., Mattisson K., Stroh E., Strömngren M., Swietlicki E., Rylander L., Hoek G., Tinnerberg H. y Modig L. (2014). Assessing ozone exposure for epidemiological studies in Malmö and Umeå, Sweden. *Atmos. Environ.* 94, 241-248.
- Muñoz Á. y Díaz J. (2001). The Catatumbo lightnings: A review. *Memorias. XIV International Conference on Atmospheric Electricity*. 08-12 de agosto de 2011. Río de Janeiro, Brasil. CD-ROM.
- Nawahda A., Yamashita K., Ohara T., Kurokawa J., Ohizumi T., Chen F. y Akimoto H. (2013). Premature mortality in Japan due to ozone. *Atmos. Environ.* 81, 538-545.
- Oookaa R., Khiemb M., Hayamic H., Yoshikadod H., Huang H. y Kawamoto Y. (2011). Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan. *Procedia Environ. Sci. Urb. Environ. Pollut.* 4, 138-150.
- Pabón J. D., Zea J., León G., Hurtado G., González O. C. y Montealegre J. E. (2001). El medio ambiente en Colombia: La atmósfera, el tiempo y el clima. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Bogotá, Colombia, 60 pp.
- Pabón J. D., Zea J., León G., Hurtado G., González O. C. y Montealegre J. E. (2005). Normas de calidad del aire a nivel internacional. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Bogotá, Colombia, 55 pp.
- Tulloch A.P. (1976). Chemistry of waxes of higher plants. En: *Chemistry and biochemistry of natural waxes*. 2^{da} ed. (P.E. Kolattukudy, Ed.). Elsevier, Amsterdam, Holanda, pp. 235-287.
- Ulaş I., Metes T. y Orhan Y. (2006). Analysis of major photochemical pollutants with meteorological factors for high ozone days in Istanbul, Turkey. *Water, Air Soil Poll.* 175, 335-359.
- USEPA (2011). EPA-600-R-10-076A. Integrated science assessment for ozone and related photochemical oxidants. Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency. Manual. Washington, D.C., EUA, 111 pp.
- Sánchez L., Morales J., Velásquez H., Portillo D., Cano Y., Montilla B., Iriarte N. y Mesa J. (2009). Composición iónica y niveles de acidez de las lluvias en Maracaibo, Venezuela, entre 1989 y 2001. *Rev. Intern. Cont. Amb.* 25, 169-179.
- Sanhueza E., Donoso L., Santana M., Fernández E. y Romero J. (1999). Atmospheric chemistry over the Auyantepuy. *INTERCIENCIA* 24, 332-380.
- Sanhueza E., Fernández E., y Donoso L. (2005). Química atmosférica en la Gran Sabana I: Composición y fotoquímica de gases inorgánicos y orgánicos. *INTERCIENCIA* 30, 602-610.
- Sena A. (2006). Tendencia de la concentración de ozono en la ciudad de Maracaibo. *Memorias. I Congreso Internacional de la Cuenca del Lago de Maracaibo*. 17-20 de marzo de 2006. Maracaibo, Venezuela, CD-ROM.
- Singla V., Satsangi A., Pachauri T., Lakhani A. y Kumari K. (2011). Ozone formation and destruction at a suburban site in North Central region of India. *Atmos. Res.* 101, 373-385.
- So K., Guo H. y Li Y. (2007). Long-term variation of PM_{2.5} levels and composition at rural, urban, and roadside sites in Hong Kong: Increasing impact of regional air pollution. *Atmos. Environ.* 4, 9427-9434.
- Tong N., Leung D. y Liu C. (2011). A review on ozone evolution and its relationship with boundary layer characteristics in urban environments. *Water Air Soil Poll.* 214, 13-36.
- Toro M., Cremades L. y Calbó J. (2006). Relationship between VOC and NO_x emissions and chemical production of tropospheric ozone in the Aburra Valley (Colombia). *Chemosphere* 65, 881-888.
- Velásquez R. (2003). Algunos mecanismos físicos de la distribución anual de las precipitaciones en Venezuela. *Rev. Aula y Amb.* 5, 34-45.

- Villanueva F., Tapia A., Notario A., Albaladejo J. y Martínez E. (2014) Ambient levels and temporal trends of VOCs, including carbonyl compounds, and ozone at Cabañeros National Park border, Spain. *Atmos. Environ.* 85, 256-265.
- Wallace J. y Hobbs P. (2006). *Atmospheric Chemistry*. En: *Atmospheric science: an introductory survey*. 2^{da} ed. (R. Dmowska, D. Hartmann y H. Rossby, Eds.). Academic Press, California, EUA, pp. 209-263.
- Wang Y., Hu B., Tang G., Ji D., Zhang H., Bai J. y Wang X. (2013). Characteristics of ozone and its precursors in Northern China: A comparative study of three sites. *Atmos. Res.* 132-133, 450-459.