

Determinación y estudio de dispersión de las concentraciones de monóxido de carbono en la zona oeste de la ciudad de Maracaibo – Venezuela

Analí Machado¹, Neyma García¹, César García¹, Alberto Córdova¹,
María Linares¹, Jorge Alaña¹, Vidal Montiel¹ y José Huertas²

¹Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Combustibles gaseosos para vehículos automotores (CEDEGAS), Apartado 526, Maracaibo 4011-A, Estado Zulia-Venezuela.

²Tecnológico de Monterrey, Departamento de energía, Monterrey – México

Resumen

El objetivo principal de éste trabajo de investigación es la evaluación de concentraciones de monóxido de carbono (CO) en ambiente, cuando estos son generados por fuentes móviles en un sector de alta densidad vehicular y poblacional. Mediante la aplicación de criterios para determinar los puntos de muestreo para fuentes móviles, se seleccionaron: La Curva de Molina como zona de emisión (Estación 1), la zona de dispersión constituida por dos puntos ubicados en una microescala, uno para época de lluvia y otro para sequía, y adicionalmente una zona localizada en Sinamaica, municipio Páez, considerada como blanco y perteneciente a la Red de Monitoreo de calidad del aire (Red-MECA) del ICLAM. Para la captación de muestra se utilizaron bolsas de muestreo y el análisis de CO, se realizó mediante Cromatografía de Gases. El lapso total de muestreo consideró dos épocas climatológicas: en los meses de Septiembre-Octubre (Época Lluviosa) y Enero-Febrero (Época Seca). Se evidenció una buena correlación entre los sitios de muestreo para el mismo poluyente indicativo de la influencia de una misma fuente de emisión. Las concentraciones de CO para el período total de muestreo rebasan la norma venezolana en 36% en los días muestreados en la zona de emisión, señalando la conveniencia de medidas de control.

Palabras clave: Emisiones de fuentes móviles, calidad de aire, monóxido de carbono.

Carbon Monoxide Concentration in a High Motor Vehicle Density Site and Dispersion Study in the west Maracaibo City – Venezuela

Abstract

The main objective of this research is to evaluate the concentration of Carbon Monoxide (CO) in the environment, due to emissions from mobile sources in a site with high motor vehicle and population densities. Through the application of criteria to determine adequate sampling points for mobile emissions sources were selected: an emission zone (a site in Maracaibo city called La Curva de Molina), and a dispersion zone with two sample points (one for the raining season and one for dry season). A zone with clear air located outside Maracaibo city called Simamaica was selected to determine background levels of contaminants. The zone belongs to the air quality monitoring network of the Institute for the Conservation of Lake Maracaibo (ICLAM). Sampling bags were used for sample collection; gas chromatography was used to determine CO content. Two weather seasons were considered for sampling period, the raining season from September through October and the dry season from January through February. A good correlation between the sampling points was found, this is an evidence of the influence of a common emission source. The CO concentration on the emission zone exceeds the Venezuela standards 36%, in the days through the sampling period; this indicates the convenience of the control actions.

Key words: Emissions from mobile sources, air quality, carbon monoxide.

Introducción

La calidad del aire en las zonas urbanas en todo el mundo se ven afectadas por el ozono y otros oxidantes, el monóxido de carbono, las partículas finas y otros contaminantes tóxicos del aire. La mayor parte de las grandes ciudades mundiales violan las disposiciones para conservar la salud, ya sea por causa de algún poluyente particular o por la múltiple presencia de ellos. Es importante puntualizar que los vehículos automotores representan la mayor fuente individual de emisión de poluentes y por consiguiente, el grado de contribución atmosférico se considera relevante.

Las emisiones de fuentes móviles han sido objeto de gran énfasis en el control legal, mayor que el de cualquier otra fuente individual de tipo estacionaria en gran número de países. Es así como en las zonas por las que circulan cientos de miles de vehículos al día, se alcanzan valores de concentración de contaminantes críticos para la salud humana y para el ambiente (10,15). De hecho, existen algu-

nas recomendaciones para megaciudades de países en desarrollo (4,13,27), las cuales intentan resolver los problemas de contaminación atmosférica, especialmente aquellos derivados del tráfico. No obstante, un requerimiento previo para la introducción de medidas o instrumentos de control y abatimiento es el levantamiento de un detallado inventario de emisiones que cubra la zona afectada, con alto nivel de desagregación espacial y temporal.

En los gases de escape de los motores como producto de una combustión incompleta aparecen además de H₂O y CO₂ poluentes tales como el monóxido de carbono (CO), H₂ y N₂ (no contaminantes), óxidos de nitrógeno (NO_x), aldehídos (RXCHO), SO₂, H₂S y partículas sólidas, así como hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados. Sin embargo, de todos los poluentes antes mencionados el que aparece en mayor proporción es el CO, por lo que es considerado como un excelente trazador del flujo vehicular (16, 22).

Muchos países establecen directrices sobre los valores máximos de las concentraciones que pueden alcanzar los contaminantes del aire y los distintos organismos de cada país se encargan de llevar estas directrices a su legislación según la estructura de su ordenamiento de competencias. Para establecer estos reglamentos se parte de la experiencia previa y del conocimiento del efecto que tienen estos contaminantes sobre la salud. No obstante, para poder controlar en una zona determinada la evolución de la calidad del aire y, sobre todo prevenir eventuales problemas se emplean herramientas de predicción como los modelos de dispersión de contaminantes. Estos modelos se basan en representaciones matemáticas de factores que afectan la dispersión de los poluentes como la difusión y advección por el movimiento del aire. Para evaluar la precisión de los modelos se requiere de valores reales medidos que permitan validar los valores calculados por los mismos, y para ello se cuenta con equipos de medición y metodologías establecidas para la captación y determinación de las concentraciones reales, así como del conocimiento de parámetros meteorológicos fundamentales para la evaluación del proceso de dispersión.

En esta investigación las concentraciones de CO fueron medidas en el aire urbano de la ciudad de Maracaibo, durante las dos épocas climatológicas, mediante Cromatografía de Gases empleando el detector de ionización a la llama con un catalizador incorporado en la base del FID.

Metodología experimental

Selección del área de muestreo

Se seleccionaron 3 zonas para la captación de muestras: una zona de emisión caracterizada por alta densidad vehicular; una zona de dispersión con baja densidad vehicular y en la dirección predominante de los vientos y una zona de referencia o blanco.

Para la escogencia de la zona de emisión se realizó un estudio, en el cual se consideraron los siguientes criterios como requisitos obligatorios (12) para el área:

- debe existir una alta densidad vehicular y problemas de congestionamiento en hora pico. Para tal fin se consideraron estudios previos (3, 18, 20), referentes a las variaciones de volumen del tráfico durante el día, con identificación de las horas picos y configuración del parque automotor que transita regularmente dicha área.
- área debe estar incluida dentro del Plan de desarrollo de la ciudad, es decir, la planificación gubernamental está contemplando realizar algún tipo de vía o solución en la zona por problemas de masificación vehicular.
- debe estar alejada de fuentes fijas, en virtud de que su cercanía pudiera interferir en la evaluación de las emisiones generadas por fuente de naturaleza móvil.
- en caso de inexistencia de datos por parte del organismo competente estatal y/o regional relacionados con las características del parque automotor de la ciudad, en principio se considerará un área de estudio en la cual coexistan varias líneas o rutas de transporte público. Ello considerando que dicho sector representa la mayor parte del parque automotor de vehículos livianos de la ciudad y presentan una edad promedio alta con bajos programas de mantenimiento, por lo cual su impacto en emisiones al ambiente será representativo de una situación crítica del impacto de esta fuente sobre la atmósfera y seres vivos en nuestra ciudad. La obtención de la información requerida (tal como las listas de las rutas y vehículos para las diferentes zonas de la ciudad) en la aplicación de este criterio fue obtenida a través de dos vías: a) por la organización encargada de administrar las rutas en la ciudad, b) a partir de un estudio previo que permitió determinar la cantidad y características del parque automotor que transita por el área objeto de estudio y cumpliendo con todos los criterios antes mencionados.
- adicionalmente el área seleccionada deberá representar una zona importante dentro de la ciudad desde el punto de vista de densidad de población y contar con un índice de crecimiento alto.

Es importante destacar que algunos de estos criterios se sustentan en estudios realizados en otros países tales como EUA, Roma, Canadá y otros (22, 17, 16).

Como resultado de la aplicación de los criterios las zonas seleccionadas fueron:

- la primera denominada “zona de emisión” (Estación 1), ubicada en la intersección de “La Curva de Molina” municipio Maracaibo, la cual se encuentra en avenida 91 con Calle 78A (Corredor vial La Limpia).
- la zona de dispersión (Estación 2) constituida por dos puntos durante el lapso total de muestreo el cual abarca dos épocas climatológicas (Lluvia-Sequía), se encuentra ubicada cercana a la zona de emisión siguiendo la dirección preferencial de los vientos y exhibe baja densidad vehicular. En la zona de dis-

persión, para la época de lluvia (2L) se ubicó a 442 metros del primer punto en la Avenida 94 con Calle 76, N° 94-40; y para la época de sequía (2S), a 353,9 metros del primer punto en la Avenida 94 con Calle 79-A, N° 93-105, Barrio “Raúl Leoni”.

- la zona de referencia situada en Sinamaica (municipio Páez, estado Zulia) es la “Estación Hidrobiológica” del Instituto para la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM), definida por este instituto como zona de referencia o blanco, con la finalidad de establecer comparación entre las diferentes zonas evaluadas ya que esta zona presenta niveles de fondo, es decir, no se encuentra influenciada notoriamente por las fuentes móviles (12).

En la Curva de Molina el flujo vehicular alcanza a 7454 veh/hora entre las 11:30 AM y 12:30 PM, la cual es considerada la hora de máxima densidad vehicular en el sector (3), donde predominan las actividades comerciales formales e informales a nivel de la acera como también alto congestionamiento vehicular. La Figura 1 muestra la ubicación de las zonas de emisión y dispersión.

Período, frecuencia y tiempo de muestreo

La captación de las muestras se desarrolló en época de lluvia (Septiembre-Octubre) y durante la época de sequía (Enero-Febrero).

La evaluación de la calidad del aire se llevó a cabo durante un lapso de muestreo que comprendió variaciones climatológicas recolectándose una cantidad mínima de veinte (20) muestras efectivas distribuidas durante todo el lapso, con una frecuencia mínima de captación de una (1) muestra cada tres (3) días; cumpliendo con lo establecido en el artículo 6 correspondiente al Decreto 638 (5) para estudios con lapsos de captura de muestra no mayores a 6 meses.

Las mediciones se efectuaron en la hora considerada como de máxima densidad vehicular (de 11:30 am a 12:30 pm), basado en el estudio de ocupación visual (EOV'96) realizado por el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura de LUZ.

Procedimiento de muestreo

El muestreo se realizó usando dos bombas Marca SKC AirCheck, modelo PCXR4, uno para cada zona de estudio, debidamente equipadas con bolsas de captura de muestra Marca SKC serie 231-05. La bombas trabajaron a una tasa de 83-83,5 mL/min, para una duración del proceso de captura de 1 hora de acuerdo con las normas de la

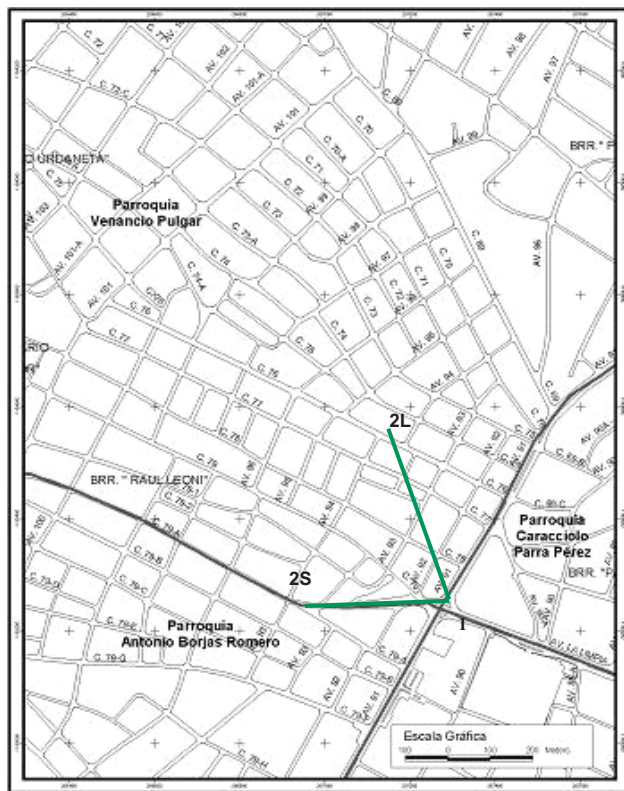


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de emisión (1) y dispersión, (2S) para sequía y (2L) época de lluvia.

EPA. La altura de captación quedó ubicada a 1.5 metros del nivel del suelo de acuerdo a lo recomendado por Martínez y cols. (14), para muestras derivadas de emisiones vehiculares.

Para la determinación de las condiciones meteorológicas prevalecientes, se instaló, tanto en la zona de emisión y dispersión una estación Marca Omega Tech. Co, con sus respectivos módulos de control WMS-14, equipada con sensores de viento, presión barométrica, temperatura y humedad relativa; la energía es provista al módulo por una batería Yuasa NP2.1-12 VDC de ácido-plomo sellado. Una computadora portátil, marca Dell Inspiron, permite la puesta en funcionamiento y finalización de la adquisición de data durante la hora de muestreo.

Análisis de las muestras

Las muestras de aire recolectadas en las bolsas fueron analizadas utilizando un cromatógrafo de gas marca Perkin Elmer, modelo AutoSystem XL, con una columna empacada, de acero inoxidable 1/8" DE x 0,085"DI x 3' longitud, rellena con tamiz molecular 5A (Molecular Sie-

ve 5A), 60/80 mesh. El gas de arrastre es Nitrógeno grado FID (99,999% de pureza) con un flujo de 30 mL/min; temperatura del horno: 36°C, temperatura del inyector: 80°C y temperatura del FID (Detector de ionización de la llama): 250°C. El reactor con catalizador de Ni/NiO/ZrO₂, soportado en grafito está alojado en la base del FID (9). Las condiciones de operación del equipo son: temperatura isotérmica de 36°C durante 14 min. El cromatógrafo fue calibrado mediante la inyección de muestras con estándares de gases conocidas con 99,9% de CO de acuerdo con la normativa de la WHO. El equipo permite un límite de detección de 1,27 ppmv.

Discusión de resultados

Evaluación de las zonas de muestreo seleccionadas

Las Figuras 2 y 3 ilustran el comportamiento de las concentraciones encontradas para CO, en las dos localizaciones seleccionadas y abarcando la época de lluvia y sequía.

Al evaluar el comportamiento de las concentraciones de los dos poluentes estudiados puede observarse que las mismas siguen un patrón similar a pesar que las correspondientes a la zona de dispersión resultan apreciablemente inferiores a las de la zona de emisión, como era de esperarse, debido a la ubicación de esta zona alejada de las fuentes (poca circulación de vehículos en el punto seleccionado), la altura del escape es baja (no puede compararse con las existentes en fuentes puntuales), a la baja flotación, y baja velocidad promedio del viento. El comportamiento antes descrito, para ambos períodos de muestreo, refleja que la **metodología propuesta** para la selección de los puntos de muestreo es correcta, lo que permite evaluar el impacto o influencia de los contaminantes generados por las fuentes móviles sobre las personas que viven y transitan en las áreas cercanas a este tipo de fuente.

En relación a la zona de referencia, el trabajo presentado por Georgoulis L. y colaboradores (7) establece que los niveles base naturales de CO en áreas alejadas de centros urbanos y actividad humana se encuentran en el orden de **0,06 – 0,14 mg/m³ (0,05 – 0,12 ppmv)**. Mientras que de acuerdo a Mukherjee P. y Viswanathan S. (21) en estudios similares se encontraron valores base horarios en un rango de **1,15-9,15 mg/m³**. Por lo antes expuesto y considerando los valores reportados para la zona de referencia (Tabla 1), puede afirmarse que Sinamaica representa un buen blanco para las emisiones de CO originadas por el parque automotor o procesos de combustión, ya que resultaron ser no detectables para las dos épocas climatológicas, esto

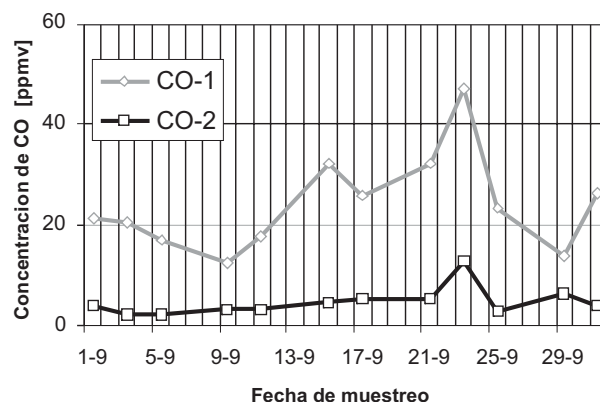


Figura 2. Comportamiento de las concentraciones de CO medidas en las estaciones 1 y 2, época de lluvia.

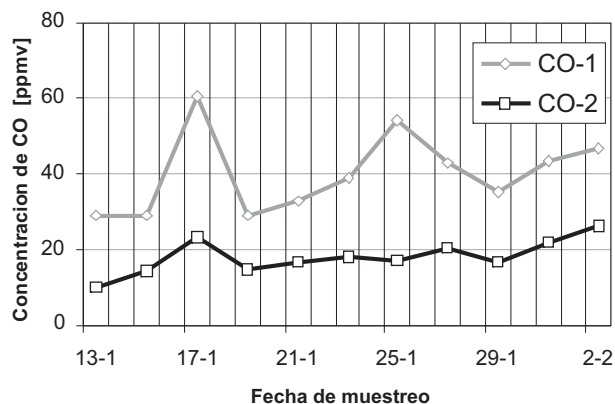


Figura 3. Comportamiento de las concentraciones de CO medidas en las estaciones 1 y 2, época de Sequía.

quiere decir que el valor hallado se encuentra por debajo del límite de detección del CO (LDD_{CO} = 1,27 ppmv) y la zona seleccionada como referencia presenta una densidad vehicular muy escasa. Éste hecho demuestra que el origen de las emisiones de CO en el ambiente guarda una estrecha relación con la densidad del parque automotor.

La relación entre los contaminantes es más apreciable en época de lluvia que de sequía, esto puede deberse a que el CO tiene un mayor tiempo de vida en la atmósfera y es un compuesto estable, mientras que en el caso de los hidrocarburos entre ellos existen numerosos compuestos reactivos como es el caso de los hidrocarburos aromáticos (HA), los cuales son importantes constituyentes de las atmósferas contaminadas pudiendo ser la causa de diferencias más notorias entre las concentraciones de los poluentes. Debido a su reactividad con el radical OH, los HA juegan un papel importante en la fotoquímica de la troposfe-

Tabla 1. Concentraciones de CO en la Zona de referencia.

Media	Fecha	CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppmv)
Lluvia	03,05,07 y 11/11/03	ND*
Sequía	14,22,28/01 y 03/02/04	ND*

Observación: Los valores de CO se encuentran por debajo del límite de detección del equipo (1.27 ppmv). *no detectado.

Tabla 2. Concentraciones promedio de CO durante el período de muestreo

CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppmv)	Zona de Emisión	Zona de Dispersión	Zona de Referencia
Lluvia	25203,45 (22,05 \pm 6,73)	4458,44 (3,90 \pm 1,39)	ND*
Sequía	45929,93(40,16 \pm 10,58)	20746,97(18,15 \pm 4,53)	ND*

Observación: Los valores de CO se encuentran por debajo del límite de detección del equipo en la zona de referencia (1.27 ppmv). *no detectado.

ra y contribuyen a la formación del “smog” fotoquímico en las áreas urbanas. Todas las fuentes importantes conocidas de HA son antrópicas, principalmente relacionadas con procesos de combustión (24). De lo antes expuesto, la importancia de trabajar con un buen trazador que permita evaluar las concentraciones del poluyente emitido por la fuente y así su influencia en la calidad del aire.

Concentraciones de monóxido de carbono

En esta sección los resultados obtenidos serán discutidos a la luz de comparaciones por época climática y por localización, conjuntamente con el uso de la **Norma Venezolana de Calidad del Aire** y normativa internacional, y valores reportados en otras investigaciones.

Las concentraciones promedio de CO son presentadas en la Tabla 2 y Figuras 2 – 5 (mostradas anteriormente), correspondientes a las dos localizaciones seleccionadas y abarcando las épocas de lluvia y de sequía. Asimismo, en la Tabla 3 se presenta los valores meteorológicos promedios para cada época. Puede apreciarse que las mayores concentraciones fueron obtenidas durante la época de sequía para el monóxido de carbono, registrándose un incremento de 45,35% (estación 1) y 78,51% (estación 2).

Como se sabe, a nivel local los principales factores de transporte y dispersión de contaminantes son el viento y la estabilidad atmosférica; puede observarse en la Tabla 3 que la velocidad promedio del viento para la época de sequía resultó mayor a las encontradas para la época de lluvia, indicativo de que los contaminantes emitidos en la estación 1 son dispersados con mayor rapidez.

En relación con la estabilidad atmosférica predominante, en las dos épocas climatológicas, estas resultaron extremadamente y moderadamente inestables, sugiriendo una adecuada mezcla vertical de los poluentes producto de la inestabilidad reinante. Esto se debe a que durante el día el aire cerca de la superficie de la tierra es más caliente y liviano que el aire en la atmósfera superior debido a la absorción de la energía solar. El aire caliente y liviano de la superficie sube y se mezcla con el aire frío y pesado de la atmósfera superior que tiende a bajar. Este movimiento constante provoca condiciones inestables y dispersa el aire contaminado.

Comparación de las concentraciones de monóxido de carbono:

Para comparar las concentraciones de CO con los valores existentes en la *normativa venezolana* debe aplicarse la estimación sugerida por Ledbetter (11), la cual relaciona C_{pi}/C_{media} con varias relaciones de tiempo de muestreo. El tiempo de muestreo en esta investigación fue de 1 hora y el considerado en la normativa venezolana es de 8 horas.

Al aplicar dicho procedimiento a la media de las 11 muestras validas de CO en época de lluvia para la *zona de emisión*, se obtiene $C_{media} = 16,96$ ppmv, lo cual implica que el valor encontrado para 8 horas en época de lluvia *excede* en más de un 60 % al valor regulado de 9 ppmv (es decir, el resultado es superior en 1,88 veces al valor regulado), pero no *excede* el 5% (35 ppmv) en el lapso de muestreo. Mientras que el valor máximo determinado en el muestreo de 32,17 ppmv para la misma época representa un $C_{medio} = 24,75$ ppmv, lo cual *excede* 2,75 veces el valor

Tabla 3. Datos meteorológicos promedios para ambos períodos de muestreo

Época	Vel. Viento (m/s)	Dirección (grados)	Presión (mb)	Temperatura (K)	Humedad (%)	Radiación solar (W/m ²)	Estabilidad
Lluvia	1,58	30.00	1010,08	305,53	74,31	30,00	A
Sequía	2,78	212.61	1018,50	303,,41	75,55	108	B

Observación: Estos datos fueron medidos por la estación meteorológica en los puntos de muestreo.

regulado de 9 ppmv; lo anterior es indicativo de una violación de la norma. Debe considerarse al evaluar los resultados obtenidos en este trabajo que los valores fueron medidos en la acera cercana a la carretera, pero que estudios realizados por Qin Y. y colaboradores (23) demostraron que las concentraciones promedio de CO medidas en la acera decrecen entre un 61% y 86% con respecto al valor en la línea central dependiendo de la configuración de la carretera, la velocidad del viento, etc., sugiriendo que las concentraciones generadas pueden tener una mayor influencia sobre la salud de los peatones si se presenta una dirección preferencial de los vientos dirigida hacia donde se encuentre la población o el peatón. Adicionalmente, debido a los valores alcanzados en las concentraciones de CO, es conveniente realizar un monitoreo continuo para apreciar los niveles alcanzados en las diferentes horas del día y no solo en una de las horas pico. Igualmente, la medición durante las 8 horas (de acuerdo a la normativa) deberían ser menores a las calculadas ya que para estas últimas se considera el valor obtenido durante una hora de alta densidad vehicular.

En la época de sequía la totalidad de las muestras superan el valor límite establecido por la normativa legal, en donde el promedio determinado en hora pico y llevado a 8 horas es de 20,08 ppmv, es decir supera el valor en normativa 2,29 veces. En la Tabla 4 se presentan las concentraciones promedio para todo el lapso de muestreo recolectado en 1 hora y calculado para 8 horas y el correspondiente límite de excedencia de muestra.

Como puede calcularse de la tabla anterior, la concentración de CO en la estación 1 para el período de ocho horas de medición se excedió en un 77,75% en relación al límite establecido en el decreto. Si se considera que el decreto permite una excedencia del 50% durante el lapso de muestreo, el exceso fue de un 36,36%, por lo que se estaría violando la normativa legal vigente, mientras que para la estación 2, el límite no fue excedido.

Los resultados indican que la atmósfera de la zona estudiada revela niveles importantes de CO asociados a emisiones significativas por parte de las fuentes móviles y que

durante lapsos importantes del día la población está sujeta a efectos indeseables, que podrían producir impacto sobre la salud.

Si se compara el valor promedio de CO en época de lluvia y sequía, para un tiempo promedio de 1 hora se obtiene que el valor encontrado es muy cercano al estándar de calidad de aire de la OMS (30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 25 ppm) y al del Edo. de California en EUA. (22900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para la época de lluvia y es excedido en la época de sequía. Si se compara dichos límites con la concentración de CO obtenida en el promedio total de muestreo, dicho límite es excedido nuevamente (para la zona de emisión o estación 1). Es importante destacar que la zona seleccionada para realizar el estudio no es la que presenta la mayor densidad vehicular de la ciudad.

En el caso de la *zona de dispersión* tanto el valor promedio encontrado en 1 hora como el equivalente a las 8 horas no exceden las normativas, en ninguno de los casos.

Los valores propuestos por la Organización Mundial de la Salud de concentraciones máximas base de CO son los siguientes: 100 mg/m^3 (86 ppmv) para 15 min, 60 mg/m^3 (52 ppmv) para 30 min, **30 mg/m^3 (26 ppmv) para 1 hr y 10 mg/m^3 (9 ppmv) para 8 hr** de exposición (7,28). Estos valores han sido determinados de manera que el nivel de COHb de 2,5% no sea excedido, para un individuo normal que se ejercite de forma ligera o moderada. Al comparar el valor sugerido como tope para 1 hora no es superado por la media en la época de lluvia, sin embargo se encuentra muy cercano al mismo (22,05 ppmv), siendo superado tres veces en el lapso de muestreo, mientras que en la época de sequía (valor promedio de 40,16 ppmv) es superado en la totalidad de los días muestreados.

Adicionalmente, debe destacarse que estudios anteriores (16) indican que exposiciones a bajas concentraciones de CO (10 a 50 ppmv) pueden afectar la habilidad de una persona para estimar intervalos de tiempo y su agudeza visual, incrementándose así las posibilidades de tener accidentes. Adicionalmente, debe considerarse que los niveles finales de COHb en la sangre dependerán no solo del contenido de CO en el ambiente y del

Tabla 4. Concentración promedio de CO para el período total de muestreo en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppmv), llevadas a 8 horas

Estación	CO, para 1 hora	CO, para 8 horas	(Decreto No. 638)	% excedencia (Nº de muestras)
1	35550,65 (31,11)	17775,32 (15,56)	10000*	86,36 (19/22)
2	12602,60 (11,025)	6301,30 (5,51)	10000*	22,73 (5/22)

*corresponde a un 50% de excedencia en el lapso de muestreo.

tiempo de exposición, sino también del tipo de actividad física realizada por el individuo.

Si se compara el resultado obtenido con el estudio realizado por Santana R. y colaboradores (25) en Caracas se observa que las concentraciones de CO son inferiores a las obtenidas en Maracaibo, de hecho ellos explican “la presencia de eventos puntuales en los cuales se han observado concentraciones con valores superiores que los límites de la normativa del Decreto 638, sin exceder el porcentaje permisible”. Sin embargo, en ambos estudios se observó la tendencia a obtener concentraciones más bajas durante los fines de semana, cuando disminuye substancialmente la circulación vehicular.

Debido a la edad del parque automotor en la zona objeto de estudio, al número de vehículos que circulan por la intersección y a que el contaminante medido fue el CO por ser un buen indicador de emisiones originadas por fuentes móviles y por su estabilidad en la atmósfera, los resultados obtenidos fueron comparados con los realizados por Schnelle K y colaboradores (26), en el cual la concentración promedio de CO (14,8 ppmv) fue obtenida en un lapso de muestreo entre Octubre y Noviembre de 1968 con condición atmosférica estable (subdividida en estable ligera e inversión ligera). Dicha investigación fue considerada en virtud de presentar las siguientes características: - velocidades de viento entre 1,52 m/s y 2,37 m/s, - tiempo de muestreo de 3 minutos durante 30 minutos en cada punto seleccionado, - en hora pico (07,50 am) - con una densidad vehicular de 4600 vehículos por hora, y fue medido a 1,52m (5,8 ft), la cual es la misma altura empleada en este trabajo y recomendada para medir la influencia de poluente sobre los peatones. Este valor es menor al obtenido en este estudio, aunque debe considerarse que el número de vehículos que circula en hora pico en “La Curva de Molina” es superior (6224) en un 26,1%. El promedio obtenido si se aplica la metodología sugerida por Ledbetter para evaluar la concentración en 8 horas de muestreo fue de 2,11 ppmv, el cual está muy por debajo del valor límite permitido; sin embargo, el valor máximo obtenido en el estudio (32 ppmv) representa para un lapso de 8 horas un valor

de 9,14 ppmv, el cual excede el valor permitido y es aproximadamente el mismo valor obtenido como máximo durante la época de lluvia en la zona de emisión, siendo sobrepasado para la misma zona en la época de sequía.

Finalmente, el análisis estadístico realizado revela que existe una diferencia significativa (con $\alpha = 0,05$), entre las medias de las concentraciones de CO en la zona de emisión y dispersión. Esta diferencia puede explicarse debido a que el poluente es emitido a una altura muy baja, presentando una altura efectiva de 5.212 metros y entre ambas zonas existen construcciones o edificios (que aunque de baja altura) representan un obstáculo en la dispersión del mismo y una limitante en el estudio.

Es importante destacar que el CO es el principal contaminante primario emitido por los automóviles, observándose altas concentraciones evaluadas en hora pico de 11:30 am – 12:30 pm, de acuerdo con la evaluación realizada por el Departamento de Vías de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Zulia y el Instituto de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Debe recalarse que las concentraciones obtenidas han presentado valores superiores a los límites de la norma del decreto 638 en casi la totalidad de los días muestreados en la zona de emisión (a excepción de tres muestras en lluvia), y que en época de lluvia las concentraciones son menores a las obtenidas en época de sequía por existir el lavado de la atmósfera y menores velocidades de viento, lo que conlleva a una menor dispersión. Las emisiones que contienen los gases de escape exhiben una amplia variación, la cual puede estar relacionada con el funcionamiento, edad, velocidad, temperatura y diseño del motor, así como del control de combustible, condiciones de combustión, forma de manejo, variación del tipo de combustible, entre otros. Un factor importante que influye en las emisiones de escape es la relación aire/combustible; las emisiones más altas de escape ocurren cuando existe mayor cantidad de combustible en la mezcla (mezcla rica) o mucho aire (mezcla pobre) producto de la eficiencia de la combustión (2). Es sabido que las concentraciones de CO dependen en mayor grado de las condiciones de operación de las fuentes (vehículos, man-

tenimiento, entonación) y de variables meteorológicas (celeridad del viento, altura de la capa de mezclado y condiciones de alta inestabilidad de la atmósfera). Es importante recordar que el transporte público (mayoría del parque automotor en la zona de estudiada) que circula en la zona de emisión presenta problemas serios de mantenimiento y funcionamiento.

Conclusiones

Por las altas concentraciones encontradas en la zona de emisión y lo antes expuesto es recomendable la aplicación de estrategias que permitan la reducción de las emisiones contaminantes de este tipo de fuente y las mismas pueden estar basadas en la aplicación de la normativa legal vigente venezolana (6), la cual obliga a la revisión de las emisiones vehiculares una vez al año para obtener el permiso de circulación.

Las concentraciones medidas de CO en la zona de dispersión siguen un patrón similar al exhibido por el mismo en la zona de emisión, pero con concentraciones inferiores, para ambos períodos de muestreo. Éste comportamiento ratifica la acertada selección de los sitios de monitoreo en ambas localizaciones. Igualmente, la buena correlación encontrada entre los sitios de muestreo para el mismo poluyente es indicativo de que ambos puntos están bajo la influencia de la misma fuente de contaminación, lo cuál confirma la validez de los criterios considerados para la selección de las zonas de muestreo. Demostrándose también la influencia de los factores meteorológicos y de la estabilidad atmosférica sobre los mismos.

Se confirma, como era de esperarse, que los niveles de CO medidos en la época de sequía superan los obtenidos en la época de lluvia, en 45,14% y 78,51% para CO en las estaciones 1 y 2.

La zona de referencia (Sinamaica) puede ser considerada como blanco para estudios de CO, ya que los niveles de concentración encontrados se encuentran en magnitudes muy bajas para ambas épocas climatológicas (no pueden ser detectados).

El tipo de estabilidad atmosférica predominante en la zona estudiada varía de extremada inestabilidad a moderada inestabilidad atmosférica durante todo el lapso de muestreo, favoreciendo así la dispersión de los contaminantes.

Al considerar los niveles de CO estimados para ocho horas de medición para un período total de muestreo en la estación 1, el 86% de un total de 22 muestras superaron el límite de calidad de aire de la norma Venezolana para CO

equivalente a 10.000 mg/m³ (para 50% de excedencia), mientras que en la estación 2, el 23% del total de las muestras analizadas rebasan dicho límite, pero el porcentaje de excedencia no es mayor al regulado.

De la comparación establecida con organizaciones como la EPA y guías de la OMS, y normativa de algunos países de América, se obtiene que la concentración promedio anual de CO alcanzada para ocho horas de medición en la zona de emisión rebasa cada uno de dichos valores límites sugeridos. Por lo antes expuesto, existe la posibilidad de que durante lapsos importantes del día la población esté sujeta a efectos indeseables, que podrían producir un impacto sobre la salud.

Deben realizarse acciones estratégicas para lograr la minimización de las emisiones de este tipo de fuente, entre las que pueden mencionarse (1):

- capacitación de instructores en el sector automotriz, para la formación dentro de las instituciones o empresas de mecánicos automotrices y policías adiestrados para futuras que permitan brindar un mejor servicio de mantenimiento y llevar a cabo mediciones de control en las carreteras.
- concientización de la población y del gobierno acerca de la contaminación atmosférica, su origen y los daños que causa una deficiencia en la calidad del aire.
- puesta en práctica de los reglamentos de tránsito aprobados como de obligatorio cumplimiento. Debe destacarse que para la aplicación de este punto falta algunas veces presupuesto adecuado y voluntad política, ya que a pesar del mandato legal no se han tomado acciones durante los 7 años de vigencia del mismo.

Un programa de control o prevención específico no puede ser propuesto inicialmente debido a que se debe realizar una evaluación de la contaminación atmosférica originada por ésta fuente cuando la normativa legal vigente en el país, sea aplicada. Adicionalmente se requeriría la aplicación posterior de un programa para la reducción de las concentraciones, debido a las deficiencias del parque automotor, y la aplicación de la normativa limitaría en gran medida la circulación de un gran número de unidades de transporte público. Sin embargo, ya que el estudio del parque automotor se basó en los vehículos de transporte público, es conveniente la aplicación de un programa de mantenimiento preventivo obligatorio para los vehículos del sector, el cual debe ser coordinado por la línea a la cual el propietario del

vehículo esté afiliado con el fin de llevar un control del mismo y garantizar la ejecución del mantenimiento.

Agradecimiento

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) de Venezuela a través del Proyecto S1-2001001064.

Referencias Bibliográficas

- BLAZER, M. (2000). **Dispersión de la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular: aplicación de un modelo matemático para Guatemala Ciudad y San Salvador**. Swisscontact, San Salvador, 57, xxxiip.
- FIELD, R., GOLDSTONE, M., LESTER, J., PERRY, R. (1992). The sources and behavior of tropospheric anthropogenic volatile hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, Vol. 26A, No. 16, 2983-2996.
- Fondo Nacional de Transporte Urbano (FONTUR) y SYSTRA (1996). **Estudio de Transporte Público Urbano de Maracaibo. Fase diagnóstico**. Financiado por Banco Mundial. Maracaibo.
- FU, L., HAO, J., HE, K. (2001). Assessment of vehicular pollution in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(5), 658-668.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4899 (26/04/1995). **Normas sobre la Calidad de Aire y Control de la Contaminación Atmosférica**. Decreto No. 638. Caracas. Venezuela. 12pp.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 36532 (04/09/1998). **Normas sobre Emisiones de Fuentes Móviles**. Decreto No. 2.673. Caracas. Venezuela. 20 pp.
- GEORGOULIS, L., HÄNNINEN, O., SAMOLI, E., KATSOUYANNI, K., KÜNZLI, N., POLANSKA, L., BRUINEN, Y., ALM, S., JANTUNEN, M. (2002). Personal carbon monoxide exposure in five European cities and its determinants. *Atmospheric Environment*. Vol. 36, 963-974.
- INSTITUTO DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO (IFAD). (1996). **Estudio de Transporte Público Urbano de Maracaibo, a través de Encuesta de Ocupación Visual**. La Universidad del Zulia.
- KAMINSKI, M., KARTANOWICZ, R., JASTRZEBSKI, D., KAMINSKI, M. (2003) Determination of Carbon Monoxide, Methane and Carbon Dioxide in Refinery Hydrogen Gases and Air by Gas Chromatography. *Journal of Chromatography*. Vol. A. 989, 277-283.
- LA PUERTA, M., HERNÁNDEZ, J. (1998). **Tecnologías de la combustión**. 1era edición, Universidad de Castilla, La Mancha-Cuenca, España, 382 p.
- LEDBETTER, J. (1972). **Air Pollution Part A: Análisis**. College of Engineering the University of Texas. Marcel Dekker, Inc., New York. 197-200` pp.
- MACHADO, A., GARCÍA, N., FERNÁNDEZ, N., GARCÍA, C., HUERTAS, J. (2003) **Criterios a Considerar en la Planificación de un monitoreo Atmosférico de emisiones generadas por Fuentes Móviles**. FONACIT. La Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería. 74 pp.
- MAGE, D., OZOLINS, G., PERTERSON, P., WEBSTER, A., ORTHOFER, R., VANDEWEERD, V., GWYNNE, M. (1996). Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment*. 30 (5), 681-686.
- MARTÍNEZ A, ROMIEU I. (1997). **Introducción al monitoreo atmosférico**. Metepec; ECO, 262 pp.
- MAYER, H. (1999) Aire pollution in cities. *Atmospheric Environment*. Vol. 22, 4029-4037 pp.
- MCCORMINCK, R.A., XINTARAS, C. (1962). Variation of Carbon Monoxide Concentrations as Related to Sampling Interval, Traffic and Meteorological Factors. *Journal of applied meteorology*. Vol. 1, 237-243 pp.
- MENICHINI, E., MONDREDINI, F., MERLI F. (1999). The temporal variability of the profile of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air: a study in a medium traffic area in Rome, 1993-1998. *Atmospheric Environment*. Vol. 33. 3739-3750 pp.
- MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA (MINFRA) (2001) **Parque automotor en circulación para el año 2001**. 2 pp. Caracas-Venezuela.
- MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA, SERVICIO AUTÓNOMO DE TRANSPORTE Y TRÁNSITO TERRESTRE (SETRA), DIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN. (2002). **Parque automotor en circulación para el año 2001**. 2 pp. Caracas- Venezuela.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (FONTUR-IMTCUMA) (1996). **Planilla resumen- volumen vehicular en intersecciones. Ubicación: Av. La Limpia – Curva de Molina**. 1pp.
- MUKHERJEE, S., VISWANATHAN, S. (2001) Contributions to CO concentrations from biomass burning and traffic during haze episodes in Singapore. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, 715-725 pp.
- Ott, W., CLARKE, J., OZOLINS, G. (1967). **Calculating Future Carbon Monoxide Emissions and Concentration from Urban Traffic Data**. U.S. Department of Health, Education and Welfare. Public Health Service. Cincinnati, Ohio, June.
- QIN, Y., KOT, S.C. (1993). Dispersion of vehicular emission in street canyons, Guangzhou city, South China (P.R.C.). *Atmospheric Environment* Vol. 27B, No. 3, 283-291.
- SANHUEZA, E., HOLZINGER, R., DONOSO, L., SANTAÑA, M., FERNÁNDEZ, E., ROMERO J. (2001). Compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de La Gran Sabana. I: Concentraciones y química atmosférica. *Interciencia*, Vol. 26, No. 12, 597-605.

SANTANA, R., ANSELMÍ, A., DELGADO, N., DÍAZ, L., SENA, A., MARTÍN, P., PÉREZ, O. (2001). Estudio de Calidad de Aire y Calidad de Combustible en el Área Metropolitana de Caracas. **Visión Tecnológica**. Vol. 8, No. 2, 131-145.

SCHNELLE, K., DEY, P. (1999) **Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide**. McGraw-Hill. New York.

WALSH, M. (1992). **Revisión de las medidas de control de las emisiones y su efectividad. Contaminación Atmosférica por Vehículos Automotores**. División de Salud Ambiental de la Organización Mundial de la Salud y Servicio de Ecotoxicología, Departamento de Salud Pública de la República y Cantón de Ginebra, Ginebra, Suiza. 83-109 pp.

WHO. (1999) **Environmental health information. Protection of the Human Environment. WHO guidelines for air quality – Chapter 6 Air quality management**, 1-34 pp.