



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES
(COV) EN LA ATMÓSFERA DEL VALLE DE TOLUCA Y AL
ORIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y SU IMPACTO EN LA
FORMACIÓN DE OZONO**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)**

P R E S E N T A

SALVADOR BLANCO JIMÉNEZ

**DIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS GERARDO RUIZ SUÁREZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM**

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, octubre de 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Copyright © 2018 por Universidad Nacional Autónoma de México
y por Salvador Blanco Jiménez. Todos los derechos reservados.

“Y esto pido en oración: que vuestro amor abunde aún más y más en conocimiento verdadero y en todo discernimiento,”

Filipenses 1:9

Gracias Dios mío por permitirme concluir este ciclo, por mostrarme el camino y conjuntarme con personas justas y buenas, en esta brecha a veces sinuosa, que con Cristo Jesús todo es posible.

En memoria de mis padres: Ernestina Jiménez, mujer de fe, disciplina y de objetivos siempre renovados y mi padre Genaro Blanco, hombre alegre, trabajador y líder, a ambos les extraño y les recuerdo con cariño... ¡Gracias!

Gracias Adriana Antonio Pérez mi amor, por tu luz, motivación, alimento e insistencia para concluir este trabajo..... mujer de tres carreras, feminista, ejemplo de tenacidad, perseverancia y preparación diaria.

A mi asesor Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez, por su impulso y objetividad, me dio la oportunidad de aprender a abordar problemas complejos en perspectiva científica, en orden orientado a objetivos y capacidades, con resultados útiles para enfrentar problemas ambientales.

Al Dr. Víctor Hugo Páramo, por su comprensión y apoyo a mi propio desarrollo científico y por permitir que los laboratorios a mi cargo se encaminen a fundamentar mejor la búsqueda de alternativas para el control y mitigación de contaminantes atmosféricos.

A mí apreciado colega, Miguel Magaña Reyes por tu invitación a conocer, profundizar y trabajar contigo en materia de compuestos orgánicos volátiles, así como a pretender conformar una red en México sobre su medición y otras metas. La mejora continua es tu ejemplo.

A mi compañero de tantas batallas y transiciones laborales, Felipe Ángeles, por compartir tus conocimientos y opiniones, siempre atento de todos, un líder.

A mis familiares, colegas, amigos y compañeros del trabajo.

Agradecimientos

Este estudio se realizó con apoyo de los proyectos PAPIIT IN1111616 y CONACYT/Semarnat 263093 con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México. En coordinación con el Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez, quien me convocó a incorporarme y generar información en el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, cuyos análisis y resultados forman parte de estos proyectos. Se agradece también el apoyo de la beca de CONACYT con registro No. 86206.

Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por permitirme con honor trabajar en su institución como Subdirector de Investigación sobre Contaminación Atmosférica, al Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa por su motivación en el desarrollo de este trabajo y su autorización para difundir estos resultados y al Dr. Miguel Magaña Reyes, Jefe del Departamento de Estudios de Compuestos Orgánicos, por su apoyo en el diseño, ejecución y análisis de muestras en el Laboratorio EACOV y sus siempre habidos sugerencias y comentarios.

Reitero mi agradecimiento al Dr. Ruiz Suárez por la dirección de esta Tesis y su gentil apoyo para la incorporación de metodologías de análisis, útiles para la gestión de la calidad del aire en este estudio. Así mismo agradezco su valiosa contribución, motivación y disposición de tiempo de cada uno de los sinodales para lograr una mejor tesis, Dra. María Elena Calderón Segura, Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill, Dra. Eliane Regina Rodrigues, Dra. Cynthia Armendáriz Arnez y Dr. Oscar Augusto Peralta Rosales.

A la Red de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, por el acceso a su información de las estaciones de monitoreo y en especial al Ing. Carlos Aguirre por su gentil apoyo en el muestreo de gases al Sur del Valle de Toluca.

A la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, por acceso a la información de su Sistema de Monitoreo Atmosférico, de su página oficial de internet, específicamente de la Estación Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

A la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales por permitir acceso a su información de Inventarios de Emisiones y publicaciones en la página oficial de internet de la plataforma gob.mx.

La Ciudad de México y el Valle de Toluca presentan año con año en periodo de estío frecuentes episodios de niveles de concentración de riesgo de exposición para la población de ozono. Para reducir o controlar a este contaminante, es necesario primordialmente, conocer la presencia y niveles de concentración de sus precursores.

El presente trabajo tiene como propósito que a partir de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) fotoactivos (PAMS, por sus siglas en inglés), de tres sitios del Valle de Toluca y en el oriente la Ciudad de México, analizar su contribución en la formación de ozono y evaluar su asociación con fuentes potenciales de emisión. Se colectaron en ambas localidades, muestras de aire ambiente de 7 a 10 de la mañana, del mes de febrero a marzo de 2017, que fueron analizadas por cromatografía de gases con los métodos TO14A y TO15 de la USEPA.

Los COV totales fueron en el Valle de Toluca de 213 ppbC en San Antonio, 735 ppbC en Paseo Tollocan, 275 ppbC en Villa Cuauhtémoc y en la Ciudad de México en Iztapalapa fue de 1054 ppbC.

Las especies químicas se clasificaron en hidrocarburos saturados de 2 a 6 carbonos (2-6S) con excepción de los que forman al gas LP; compuestos insaturados de 2 a 6 carbonos (2-6N) con excepción de isopreno; COV de cadena larga saturados (7-9S), del gas LP (GLP, propano, n-butano e isobutano), aromáticos, isopreno y otros. Para Tollocan del Valle de Toluca la abundancia fue en el orden: aromáticos > GLP > 2-6S > 2-6N > 7-9S > isopreno. En contraste para la Ciudad de México en Iztapalapa fue GLP > 2-6S > aromáticos > 2-6N > 7-9S > isopreno.

La formación potencial de ozono mediante el factor MIR (máxima reactividad incrementada o índices de Carter actualizados a 2010), sugiere que en el Valle de Toluca de forma consistente los compuestos aromáticos aportan del 52 al 56% y las olefinas del 27 al 28% en la formación del ozono, en cambio en la Ciudad de México en Iztapalapa las olefinas son las de mayor generación de ozono (43%), los compuestos aromáticos (27%) y el gas LP (17%).

Se realizó adicionalmente un análisis de la contribución de fuentes de emisión por medio del modelo receptor PCA/APCS – MLR (Análisis de componentes principales con puntuación absoluta y regresión lineal múltiple, por sus siglas en inglés). Se distinguen contribuciones de COV para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de cuatro fuentes de emisión: vehiculares (40%), evaporativas (32%), gas licuado presurizado (16%) y uso de disolventes (12%). Para el Oriente de la Ciudad de México, se determinaron aportes de cuatro grupos de emisión: fugas de gas LP (52%), emisiones vehiculares (27%), industria (13%) y uso de disolventes (8%).

Estos resultados sugieren las fuentes de emisión a las que se deben enfocar las políticas públicas para reducir la exposición de ozono y sus efectos en el ser humano, la biota y en el clima.

Contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	1
Los Compuestos Orgánicos Volátiles precursores de ozono	3
Niveles de ozono en el Valle de Toluca y la Ciudad de México.....	7
Capítulo 2 OBJETIVOS.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos	10
Capítulo 3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
Muestreo en sitios seleccionados.....	11
Análisis Instrumental por Cromatografía de Gases	15
Análisis de Resultados	23
Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
Análisis estadístico descriptivo de los compuestos orgánicos volátiles	28
Evaluación de reactividad y formación potencial de ozono	48
Contribución de fuentes potenciales de emisión	50
Compuestos contaminantes del aire fotoactivos peligrosos para la salud	61
Capítulo 5 CONCLUSIONES	63
Referencias	65
Anexos	72
Anexo 1. Constantes utilizadas, técnicas de laboratorio, límites de cuantificación y diferencia porcentual relativa para cada compuesto orgánico volátil.....	73
Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca	74
Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México.....	79
Anexo 4. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en el Valle de Toluca	84
Anexo 5. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México.....	89

Lista de tablas

Tabla 1. Área estatal representada por los Municipios del Valle de Toluca del Estado de México atendidos en este estudio

Tabla 2. Actualizaciones de la Norma Oficial Mexicana de protección de la salud por exposición a ozono en México

Tabla 3. Concentraciones máximas de ozono por arriba de la exposición regulada de 0.095 ppm para una hora y de 0.070 ppm para ocho horas

Tabla 4. Especies químicas fotorreactivas del gas de calibración PAMS

Tabla 5. Parámetros meteorológicos registrados en los sitios de estudio

Tabla 6. Grupos característicos de compuestos orgánicos volátiles asociados a fuentes potenciales de emisión

Tabla 7. Concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles (ppb) en tres sitios del Valle de Toluca y en un sitio de la Ciudad de México

Tabla 8. Comparación estadística mediante la prueba de Mann-Whitney de los datos de COV entre pares de sitios en las cuatro localidades ($p < 0.05$)

Tabla 9. Correlación de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de diversas fuentes de emisión del muestreo del Valle de Toluca

Tabla 10. Correlación de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de diversas fuentes de emisión del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México

Tabla 11. Concentraciones de COV (ppbC) por grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Tabla 12. Referencias de análisis de COV en diferentes condiciones ambientales para comparar VOC seleccionados en este estudio

Tabla 13. Estimación de la reactividad por degradación del radical OH (τ s) de cada grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Tabla 14. Porcentaje de formación potencial de ozono para cada grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Tabla 15. Cocientes de BTEX de los cuatro sitios de muestreo en el Valle de Toluca y Ciudad de México

Tabla 16. Inventario de emisiones de COV en los Municipios de los sitios de muestreo en el Valle de Toluca del Estado de México y de la Delegación Iztapalapa en la Ciudad de México (toneladas/año)

Tabla 17. Discrepancia entre el Inventario de Emisiones y las mediciones realizadas en los sitios de muestreo del Valle de Toluca y en Iztapalapa en la Ciudad de México

Tabla 18. Análisis de Componentes Principales de COV del Valle de Toluca

Tabla 19. Análisis de Componentes Principales de COV de Iztapalapa en la Cd. de México

Tabla 20. Comparación de concentraciones de COV tóxicos en los sitios San Antonio La Isla, Tollocan, Villa Cuauhtémoc e Iztapalapa con relación a los límites de exposición de protección de la salud de la población

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo del papel de los compuestos orgánicos en la conversión de NO a NO₂ (Finlayson-Pitts y Pitts, 1997)

Figura 2. Situación geográfica de los sitios de muestreo. Las estrellas indican los sitios Villa Cuauhtémoc, Tollocan y San Antonio La Isla en el Estado de México e Iztapalapa en la Ciudad de México

Figura 3. Cánisters SUMMA de acero inoxidable para el muestreo de aire ambiente para análisis de COV: a) Sistema de limpieza de los cánisters mediante ciclos de vacío y purga con nitrógeno y calentamiento con mantillas. b) adaptación de controlador de flujo de orificio crítico y temporizador para realizar muestreos integrados y programados

Figura 4. Esquema del sistema analítico de hidrocarburos precursores de ozono (PAMS) en el Laboratorio de COV del INECC. Existen dos posibilidades de entrada: muestras colectadas en cánisters, y gases de calibración y blancos

Figura 5. Esquema del sistema analítico del método TO15 de la USEPA en el Laboratorio de COV del INECC

Figura 6. Concentración de COV de las doce especies químicas más abundantes de los sitios San Antonio La Isla, Tollocan y Villa Cuauhtémoc en el Valle de Toluca y en Iztapalapa en la Ciudad de México

Figura 7. Concentración de COV por grupo de compuestos en las localidades del Valle de Toluca y al Oriente de la Ciudad de México en Iztapalapa

Figura 8. Comparación de COV seleccionados por diversas fuentes de emisión con respecto a niveles de concentración obtenidos en otros estudios. El círculo azul representa la media

Figura 9. Aporte de compuestos orgánicos volátiles por las principales fuentes de emisión conforme al modelo PCA/APCS-MLR para el Valle de Toluca

Figura 10. Contribuciones de COV por fuentes de emisión en los diferentes sitios de muestreo en el Valle de Toluca

Figura 11. Contribución de los compuestos del gas LP en los factores 1 y 2 de las fuentes potenciales de emisión en el Oriente de la Ciudad de México

Figura 12. Aporte de compuestos orgánicos volátiles por las principales fuentes de emisión conforme al modelo APC/APCS-MLR en Iztapalapa en la Ciudad de México

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca está conformada por 22 municipios, los cuales comprenden una superficie de 2,669.6 km². En la que viven 2,444,743 habitantes. Tiene una altitud promedio de 2,610 metros sobre el nivel del mar.

Se localiza en la parte centro del Estado de México; colinda al Norte con los municipios de San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca, Jiquipilco y Nicolás Romero; al Oriente con Isidro Fabela, Jilotzingo, Naucalpan, Huixquilucan y con la Ciudad de México; al Sur con Ocuilan, Joquicingo, Tenancingo, Villa Guerrero y Coatepec Harinas y al Poniente con Temascaltepec, Amanalco y Villa Victoria.

Está rodeada por grandes sierras y aparatos volcánicos individuales, entre ellos se encuentra: al suroeste, la Sierra Nevada de Toluca; al este, la Sierra de las Cruces y Sierra de Ocoyotepec; al noreste, la Sierra de Monte Alto y al sur, la Sierra Matlazinca; además se encuentran en forma aislada algunas elevaciones, entre las que destaca, el volcán Molcajete en la Sierra Morelos, al noreste del municipio de Toluca. En esta región prevalece el clima templado húmedo, con tres épocas climáticas:

- (a) Seca-fría, con temperatura promedio mensual más baja durante el año y comprende los meses de noviembre a febrero, con un rango de entre 9° y 11° C, con registro de nevadas, en forma ocasional por las temperaturas bajo cero registradas en esta época.
- (b) Seca-cálida, dentro de los meses de marzo a mayo se presenta un ascenso en la temperatura hasta llegar a los 15° C. La precipitación pluvial es escasa, inferior a los 40 mm.
- (c) Época de lluvias, definida por los meses de junio a octubre, se caracteriza por la presencia de precipitaciones que se desarrollan con un rango de entre 160 y 210 mm. En cuanto a la temperatura de esta época, se manifiesta un decremento para mantenerse entre los 11° y 13° C.

La circulación del viento y, por tanto, la ventilación se ve favorecida debido a que en la zona sus barreras geográficas no están continuas y no mantienen encapsulado al Valle de Toluca, que por cierto tiene una marcada dominancia de

los vientos del sur y sureste, para invierno y verano, respectivamente (Proaire 2012-2017, 2012).

En especial en este estudio se pone énfasis a los Municipios del Valle de Toluca citados en la Tabla 1.

En el país, la Ciudad de México por su gran número de habitantes, y por el grado de conciencia que ellos tienen sobre el problema de la contaminación atmosférica, ha sido la más consistente en evaluar su calidad del aire y se han realizado múltiples estudios en esta localidad. Recientemente, en 2014, se creó la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) que tiene como propósito generar medidas y acciones para prevenir y revertir la mala calidad del aire regional, que involucren de forma integrada a la Ciudad de México y los Estados de Hidalgo, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Querétaro y Estado de México.

En esta región CAME, solamente en el Área Metropolitana de la Ciudad de México se han llevado a cabo estudios de contaminantes atmosféricos de especiación de compuestos orgánicos volátiles (COV) en diversas campañas de medición y se tienen registros de publicaciones científicas de los niveles de concentración en los que se destacan:

- Estudio MARI en 1992 (Ruiz, Arriaga y García, 1996; Streit y Guzman, 1996)
- Campaña realizada en febrero de 1993 por Blake y Rowland (1995)
- Mediciones del Instituto Mexicano del Petróleo de 1992 a 2001 (Arriaga-Colina et al., 2004)
- Análisis del Instituto Nacional de Ecología al Oriente de la Ciudad de México del 2000 al 2007 (Wöhrnschimmel et al., 2010)
- Campaña internacional CAM-MIT en 2002 y en 2003 (Velasco et al., 2007)
- Campaña internacional MILAGRO en 2006 (Molina et al., 2010)
- Muestreo del Instituto Nacional de Ecología en diversas localidades del Área Metropolitana de la Ciudad de México en 2005, 2006, 2011 y 2012 (Garzón et al., 2015)
- Durante un episodio de contaminación por ozono en 2012 (Jaimes-Palomera et al., 2016)

Este estudio pretende presentar elementos de juicio, a través de analizar información útil para los tomadores de decisiones en torno a reducir los niveles de concentración de ozono en la región del Valle de Toluca.

Tabla 1. Área estatal representada por los Municipios del Valle de Toluca del Estado de México atendidos en este estudio

Municipios	Cabecera Municipal	Latitud (máx.)	Longitud (máx.)	Superficie (Km ²)	%
Otzolotepec	Villa Cuauhtémoc	19°45' N	99°11'O	128.0	4.7
Toluca	Toluca de Lerdo	19°17' N	99°40'O	420.1	15.8
San Antonio la Isla	San Antonio la Isla	19°10' N	99°34'O	24.1	0.9

Los Compuestos Orgánicos Volátiles precursores de ozono

Actualmente no hay una definición exacta de los compuestos orgánicos volátiles, la más aceptada se refiere a los COV como aquellos compuestos que contienen al menos un carbono en su molécula o bien un enlace carbono-hidrógeno. Los COV tienen una temperatura de ebullición de hasta 250 °C o presión de vapor mayor a 13.3 kPa a condiciones estándar (USEPA, 1999a). La Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) ha declarado 189 compuestos como contaminantes atmosféricos de riesgo y sugiere que se dé seguimiento a 97 COV dentro de este grupo (USEPA, 1999b). En la práctica su medición es limitada por su estabilidad en el muestreo y la posibilidad de calibrarse en instrumentos analíticos. Dentro de estos compuestos existen 56 compuestos fotorreactivos factibles de poderse coleccionar, trasladar y analizarse en laboratorio. Más adelante se describirán en detalle las metodologías empleadas.

Los COV se emiten como gases o vapores de varias fuentes diarias de emisión, como conducir vehículos (Thornhill et al., 2010), pintar edificios (Celebi y Vardar, 2008), y en la cocina si hay fugas en la instalación de gas licuado presurizado o gas natural. Algunos COV, como el isopreno y otros monoterpenos, se emiten naturalmente por las plantas a la atmósfera (Lindfors y Laurila, 2000). Ciertos compuestos orgánicos volátiles además de ser precursores en la formación de ozono, se consideran contaminantes tóxicos y tienen efectos adversos a corto y largo plazo sobre la salud humana, como irritación de las membranas mucosas, ojos y garganta, así como propiedades mutagénicas, carcinógenas y teratogénicas.

La exposición al ozono que se encuentra a nivel de las actividades del ser humano, es perjudicial para su salud y causa enfermedades respiratorias,

disminuyendo la capacidad de los pulmones para realizar funciones normales, así como su envejecimiento prematuro. El ozono troposférico, el carbono negro y el metano son contaminantes climáticos de corta duración que, después del CO₂, son los más importantes contribuyentes al efecto de calentamiento global, con múltiples impactos perjudiciales para la salud humana, la agricultura y los ecosistemas (Institute for Governance & Sustainable Development, 2013).

El ozono de la troposfera es un contaminante secundario formado por la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x) y luz solar. La velocidad de formación de O₃ varía, dependiendo de la cantidad de NO_x y COV en la atmósfera. En algunas condiciones, la producción de O₃ aumenta con los COV, mientras que en otros no cambia o disminuye con NO_x. Para formular políticas ambientales efectivas, la relación entre COV y NO_x debe ser estudiada para cada lugar (Sillman, 1999). Por sí mismos, los NO_x son peligrosos para la salud humana, causando enfermedades respiratorias. NO_x (NO + NO₂) son emitidos en la atmósfera por fuentes antropogénicas y naturales, como la quema de combustibles fósiles y la quema de biomasa (Zhang, Tie y Bond, 2003).

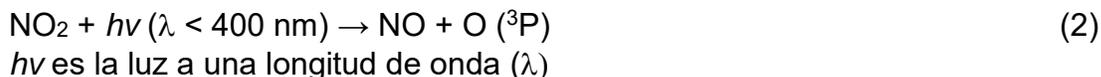
El ozono es formado en la troposfera cuando la luz causa reacciones fotoquímicas complejas que involucran a los óxidos de nitrógeno (NO_x) y a los compuestos orgánicos volátiles (Van Langenhove, 2002).

El ozono es generado por la combinación del oxígeno molecular (O₂) con oxígeno atómico (O):



M representa cualquier otra molécula, la cual absorbe la energía de la reacción.

El átomo de oxígeno libre e inestable O (³P), resulta de la fotólisis del dióxido de nitrógeno por la luz.



Otra reacción importante es la del ozono con el óxido nítrico (titulación del ozono):



La reacción 1 y 2 permiten la formación del ozono, mientras que la reacción 3 remueve al ozono. De esto se entiende que la formación o remoción de ozono de la troposfera depende de las tasas de reacción y las concentraciones relativas de NO_2 y NO (Van Langenhove, 2002; Monks et al., 2015).

En la Figura 1 se observa el papel fundamental que tienen los compuestos orgánicos volátiles al incrementar la formación de NO_2 .

Primero el radical hidroxilo ($^{\circ}\text{OH}$) ataca al $\text{COV}(\text{RH})$ para formar el radical (R°) (Ecuación 4), enseguida el radical peróxido (ROO°) es formado procedente de la reacción del radical con el oxígeno molecular (Ecuación 5) que oxidará NO a NO_2 (Ecuación 6):



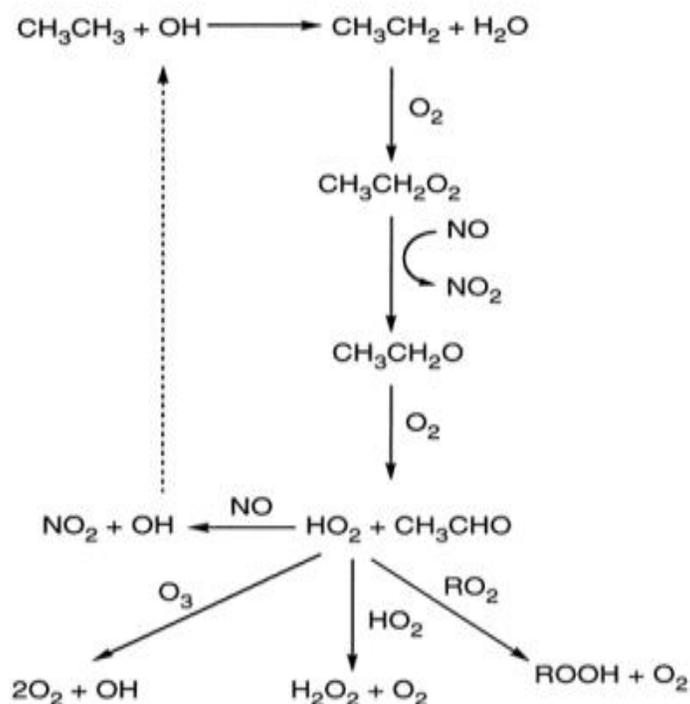


Figura 1. Ejemplo del papel de los compuestos orgánicos en la conversión de NO a NO₂ (Finlayson-Pitts y Pitts, 1997)

Varios estudios en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México han encontrado que los problemas de calidad del aire debido a NO_x son causados por fuentes industriales, vehículos y un sistema de transporte público ineficiente (Molina y Molina, 2002; Molina et al., 2007; Molina, Vázquez-Martínez y Páramo, 2009; Islas et al., 2011). En las últimas décadas, el gobierno mexicano se ha centrado en reducir las emisiones de COV y NO_x, con el objetivo de mejorar la calidad del aire en esta región (Molina et al., 2007; Molina, Vázquez-Martínez y Páramo, 2009). Para evaluar la efectividad de medidas y acciones, es necesario evaluar a los COV como precursores de ozono a lo largo del tiempo.

La información presentada en este estudio contribuye en la propuesta de nuevas medidas de control para la región del Valle de Toluca. Así mismo, también permitirá evaluar los cambios en las intensidades relativas entre los diferentes tipos de fuentes debido a las políticas de control de emisiones, en tanto se siga un protocolo similar de investigación en mediciones futuras de COV.

Niveles de ozono en el Valle de Toluca y la Ciudad de México

Es importante señalar que en las áreas de estudio, las concentraciones de ozono son relevantes, entonces sus precursores son necesarios de caracterizar tales como los óxidos de nitrógeno que por ser un contaminante criterio se mide forma sistemática, lo que no ocurre con los compuestos fotorreactivos como los hidrocarburos volátiles, que tienen múltiples fuentes de emisión.

La concentración límite de exposición de ozono ha tenido cambios a lo largo del tiempo, tanto en los umbrales de concentración como en los tiempos de exposición. A la fecha la NOM-020-SSA1-2014 es la norma vigente que establece que la población no debe exponerse a 95 partes por billón (ppb) en una hora y a 70 ppb en 8 horas continuas, conforme a las actualizaciones de peso de evidencia epidemiológica y de efectos en la salud provocados por este contaminante (Tabla 2).

Tabla 2. Actualizaciones de la Norma Oficial Mexicana de protección de la salud por exposición a ozono en México

Norma Oficial Mexicana	Fecha de publicación	Valor límite de una hora (ppm)	Valor límite de ocho horas (ppm)
NOM-020-SSA1-1993	23-Dic-1994	0.110	-----
Modificación NOM-020-SSA1-1993	30-Oct-2002	0.110	0.080
NOM-020-SSA1-2014	19-Ago-2014	0.095	0.070

Enseguida se muestran los registros de ozono de las áreas de estudio.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) publica anualmente el informe de calidad del aire que para el año base 2015 (INECC, 2016), las ciudades en las que con mayor frecuencia se presentaron días con concentraciones de ozono superiores al límite normado de una hora, de 0.095 ppm (estimado como número de días con concentraciones superiores al límite normado / número de días del año con información válida) fueron del orden del 4% para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y del 58% de los días del año para la Zona Metropolitana del Valle de México. Estas regiones bajo estudio se encuentran entre las 13 localidades o regiones más contaminadas en donde se realiza monitoreo continuo para este contaminante (Tabla 3). La Zona Metropolitana de la Ciudad de México ocupa el segundo lugar, tanto para

promedios horarios de una hora, así como para promedios móviles de ocho horas; en tanto que para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca sólo es crítico para promedios de una hora, ocupando el décimo lugar de 13 localidades o regiones más contaminadas por ozono del país (INECC, 2016).

Tabla 3. Concentraciones máximas de ozono por arriba de la exposición regulada de 0.095 ppm para una hora y de 0.070 ppm para ocho horas

Localidad o Región	1 hora	8 horas
León, Guanajuato	0.181	0.136
Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Ciudad de México y conurbación con el Estado de México	0.179	0.130
Irapuato, Guanajuato	0.178	0.124
Cuautla, Morelos	0.171	0.096
Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), Nuevo León	0.157	0.096
Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), Jalisco	0.144	0.103
Atotonilco de Tula, Hidalgo	0.134	0.109
Tula de Allende, Hidalgo	0.132	0.100
Salamanca, Guanajuato	0.125	0.098
Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), Estado de México	0.122	-----
Pachuca, Hidalgo	-----	0.097
Tepic, Nayarit	-----	0.093
Cuernavaca, Morelos	-----	0.092

Conforme al Proaire del Valle de Toluca (2012-2017), la concentración y distribución de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, refleja un comportamiento horario típico, asociado a la influencia directa de las emisiones generadas durante la actividad diaria de los habitantes de la zona, la meteorología, así como a la capacidad oxidativa de la atmósfera. Durante diciembre del 1996 los niveles de O₃ alcanzaron las máximas concentraciones históricas, registrando concentraciones de 0.220 ppm (Proaire 2012-2017, 2012).

En la Ciudad de México de abril de 2016 a junio de 2017, las condiciones meteorológicas y al mismo tiempo la gran cantidad de vehículos en circulación y las actividades de los habitantes que residen en esta localidad, se presentaron en ambos veranos episodios con elevados niveles de ozono que llevaron hacia acciones emergentes por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME, 2017).

Recientemente se ha publicado un programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis (CAME, 2017) que comprende a los Estados de Querétaro, Hidalgo, México, Puebla, Tlaxcala y la Ciudad de México, con el objetivo de lograr metas comunes y acciones coordinadas para controlar y revertir la contaminación del aire de la región. En este plan se menciona que “la cuenca atmosférica del Valle de México ha sido estudiada intensivamente desde el punto de vista meteorológico, químico y fotoquímico, no siendo este el caso de las cuencas atmosféricas adyacentes. Los resultados de campañas cortas realizadas por diversos investigadores indican que, al igual que en el Valle de México, la formación del ozono en las áreas urbanas está condicionada por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, de cuyo control dependerá en gran medida la mejora de la calidad del aire de la región”. Por ello es importante considerar caracterizar a los compuestos orgánicos volátiles en las atmósferas de las diferentes ciudades de la Megalópolis por sus efectos en la formación de ozono y de aerosoles orgánicos secundarios.

Capítulo 2

OBJETIVOS

Objetivo General

Caracterizar las especies químicas precursoras de ozono de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y al Oriente de la Ciudad de México y evaluar su impacto en su contribución reactiva hacia la formación de ozono y sus posibles fuentes de emisión.

Objetivos Específicos

1. Comparar los niveles de concentración de los compuestos orgánicos volátiles de sitios localizados en el Valle de Toluca con respecto a la Ciudad de México.
2. Evaluar la reactividad y la formación potencial de ozono de las atmósferas de la Ciudad de México y Toluca por su composición de compuestos orgánicos volátiles.
3. Conocer y jerarquizar, a través de la especiación química, mediante modelación de receptores por componentes principales absolutos, las fuentes de emisión que contribuyen en la generación de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y al Oriente de la Ciudad de México.

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo en sitios seleccionados

Se realizó una campaña corta de colecta de muestras de aire ambiente en el periodo comprendido del 18 al 28 de febrero y del 8 al 16 de marzo de 2017 en tres sitios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, al Sur en el Municipio de San Antonio La Isla, al Centro en la lateral de la Av. Tollocan y al Norte en el Municipio de Otzolotepec en Villa Cuauhtémoc.

Así mismo se realizó monitoreo continuo de COV de forma horaria de 7:00 a 10:00 horas por la mañana, durante el 2 y 7 de febrero y los días 4, 9, 10, 23 y 28 de marzo de 2017.

Este último muestreo forma parte de un programa de monitoreo continuo de COV, efectuado de mayo de 2016 a mayo de 2017 en los laboratorios del INECC, ubicados en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Este análisis se llevó a cabo utilizando la técnica de cromatografía de gases con detector de ionización de flama, colectando la muestra de aire ambiente cada hora, siguiendo el método TO14A de la USEPA, que se describe posteriormente.

En la Figura 2. Se muestran los sitios de monitoreo del Valle de Toluca y Ciudad de México.

En la Figura 3 se presenta en detalle el sistema de toma de muestras en cánisters SUMMA marca Rasmussen-Sibata con una válvula Nupro de Swagelok. Los cánisters SUMMA son recipientes especiales de acero inoxidable de 6 litros de capacidad, electropulidos en sus superficies internas y recubiertas con óxido de cromo para evitar la adhesión de los COV a las paredes.

Antes de su utilización, se acondicionó cada cánister mediante un proceso en el que se realizan cuatro ciclos de vacío (9 minutos) y purga (6 minutos) con nitrógeno (grado cromatográfico), a la vez que se calienta mediante una mantilla alrededor de 90°C (Figura 3a). Al final del proceso se obtiene el recipiente limpio y vacío a -60 cm de Hg.

La limpieza de los cánisters se realiza con un equipo marca DKK, modelo GAS-2BR que cuenta con una bomba de vacío y una entrada para gas de purga. El

aparato está conectado a una tubería de acero inoxidable que permite ensamblar hasta cuatro cánisters a la vez. El sistema cuenta con un humidificador lleno con agua desionizada, de modo que el vapor de agua que entra junto con el nitrógeno de purga, contribuye a arrastrar los COV adheridos a las paredes del cánister y a lograr una mejor limpieza del mismo (Figura 3a).

Una vez que los cánisters están limpios y han sido evacuados a -60 cm de Hg, pueden utilizarse para la colecta de muestras de aire ambiente. Para el presente estudio, se realizaron muestreos integrados en el tiempo, en los que la muestra se tomó a lo largo de un intervalo de tiempo de 3 horas consecutivas. Para este fin se adaptó al cánister un controlador de flujo de orificio crítico (Figura 3b), el cual tiene un conector con una apertura muy pequeña, cuyo tamaño depende del flujo de entrada deseado. Así que para obtener muestras de 3 horas se utilizaron orificios críticos de 3.0 milésimas de pulgadas.

Para lograr la apertura y cierre del cánister de manera automática, se conectó entre el cánister y el controlador de orificio crítico, un temporizador programable que cuenta con una válvula solenoide normalmente cerrada, que actúa eléctricamente y es alimentada por una batería recargable. El uso del temporizador permite programar la apertura de la válvula solenoide (y en consecuencia el llenado del cánister) el día y la hora deseada (Figura 3b).

Se obtuvieron en campo 4800 mL de muestra y el cánister fue llenado en laboratorio hasta los 5000 mL con nitrógeno grado cromatográfico, para su posterior análisis de analitos.

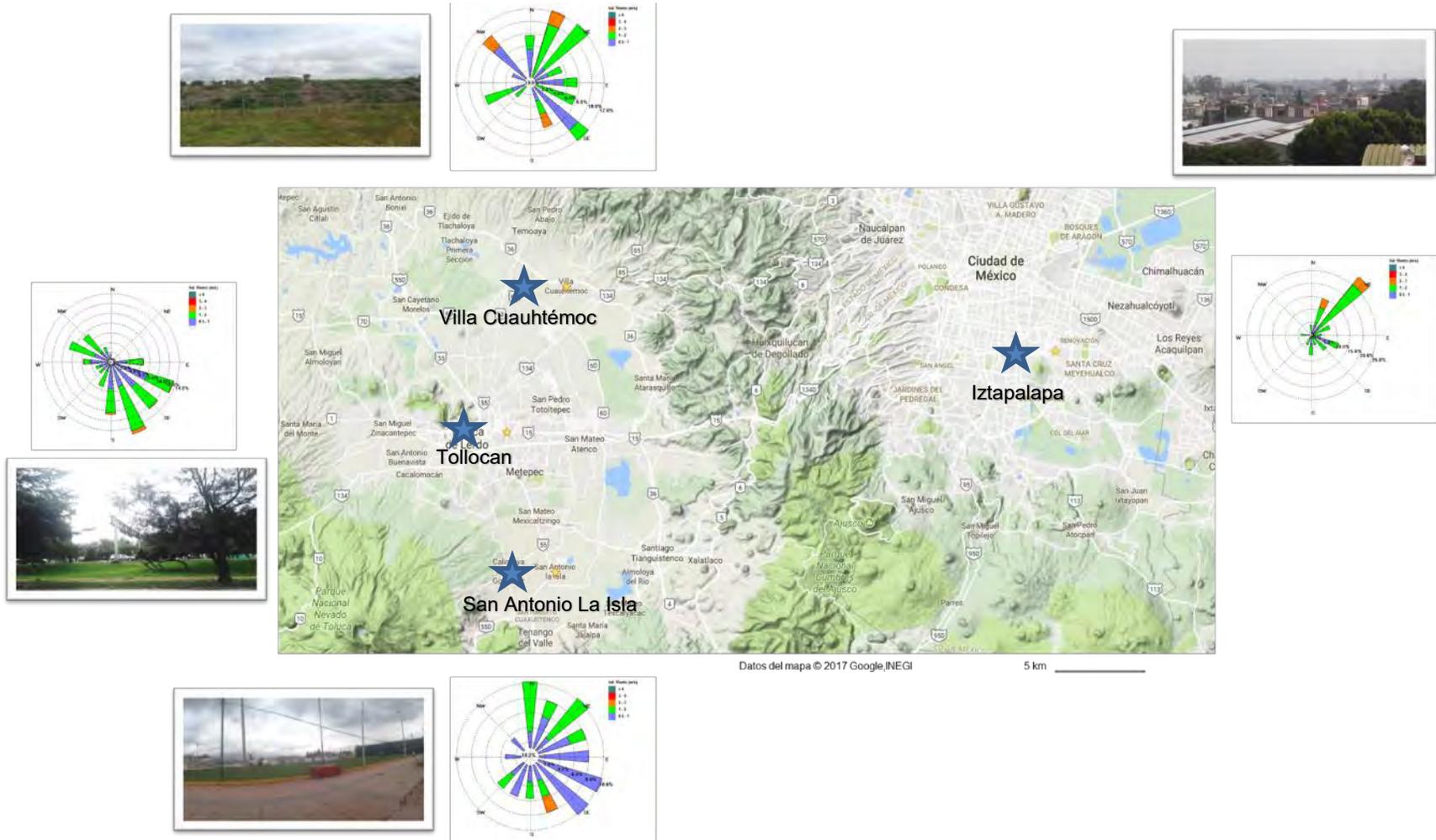


Figura 2. Situación geográfica de los sitios de muestreo. Las estrellas indican los sitios Villa Cuauhtémoc, Toluca y San Antonio La Isla en el Estado de México e Iztapalapa en la Ciudad de México



Equipo de limpieza con mantillas de calentamiento y recóstatos

a) Limpieza de cánisters



Cánister

b) Muestreo integrado y programado de aire ambiental

Figura 3. Cánisters SUMMA de acero inoxidable para el muestreo de aire ambiente para análisis de COV: a) Sistema de limpieza de los cánisters mediante ciclos de vacío y purga con nitrógeno y calentamiento con mantillas. b) adaptación de controlador de flujo de orificio crítico y temporizador para realizar muestreos integrados y programados

Análisis Instrumental por Cromatografía de Gases

El análisis de las muestras de aire ambiental obtenidas en cánisters se realizó combinando dos métodos, con énfasis en precursores de ozono conforme a lo siguiente:

1. Análisis cromatográfico para determinar compuestos orgánicos volátiles precursores de la formación de ozono (PAMS, por sus siglas en inglés) siguiendo el método de la EPA TO14A (USEPA, 1999a). Se realiza mediante un cromatógrafo de gases Hewlet Packard 6890 con un detector FID, acoplado a un sistema de concentración de muestras basado en una trampa con un triple lecho de materiales adsorbentes (carbón activado, Tenax TA y alúmina), enfriada mediante bióxido de carbono líquido para la adsorción de las muestras a 5°C. Los analitos se desorben posteriormente mediante el calentamiento de la trampa a 250°C. Mediante este sistema se analizaron 36 especies de hidrocarburos precursores de ozono que incluyen: parafinas, isoparafinas, olefinas, nafténicos y aromáticos.
2. Análisis cromatográfico mediante el método de la EPA TO15 (USEPA, 1999b), para analizar compuestos orgánicos volátiles tóxicos en aire ambiente mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. El análisis se realiza en un cromatógrafo Agilent 6890N, acoplado a un espectrómetro de masas Agilent 5975B. El equipo cuenta con un sistema de preconcentración criogénica ENTECH 7100A que opera con nitrógeno líquido para el enriquecimiento de las muestras mediante un método de micropurga y trampa. Mediante este sistema se analizaron para confirmar algunas especies de compuestos orgánicos volátiles.

En la Figura 4 se muestra el esquema de análisis de COV PAMS mediante cromatografía de gases realizado en el laboratorio de COV del INECC que se describe a continuación.

El sistema cuenta con dos posibles entradas de gases:

- 1) Muestras colectadas en cánisters
- 2) Gases estándar para calibración o gases para blancos (nitrógeno o helio).

Análisis de Cánisters

Los cánisters se ensamblan para su análisis en un rack con capacidad para 9 cánisters (marca DKK, Modelo GAS-2BCR). El rack es operado mediante un controlador (GAS-2BD de DKK) que determina de qué posición del rack se tomará la muestra.

Estándares de calibración

El gas de calibración pasa a través de un equipo de dilución dinámica marca Entech, Modelo 4100A. El equipo cuenta con dos controladores de flujo másico operados mediante software. El primer controlador de flujo se usa para el gas de dilución (nitrógeno) en un intervalo de flujos de 50 a 5000 mililitros por minuto (mL/min) mientras que el segundo, destinado para el gas estándar opera de 0.8 a 50 mL/min. Con la correcta combinación de flujos, se logra diluir el gas de calibración de 1 parte por millón en volumen (ppmV) a niveles de unidades de partes por billón en volumen (ppbV).

Concentrador de muestras

El concentrador de muestras marca DKK, modelo GAS-30, es un equipo que cuenta con una trampa tubular rellena con tres materiales adsorbentes: carbón activado, alúmina y Tenax TA. La muestra proveniente del humidificador pasa hacia el concentrador de muestras mediante los siguientes pasos:

La muestra circula a través de la tubería del concentrador para purgar las líneas (aprox. 200 mL).

Los analitos de interés se adsorben (60 mL) en la trampa enfriada mediante bióxido de carbono líquido a 5°C.

La trampa se purga con helio cromatográfico para eliminar la humedad (el agua afecta la columna cromatográfica).

Los analitos se desorben mediante el calentamiento de la trampa a 250°C y pasan a la columna cromatográfica.

El flujo de la muestra desde la entrada del humidificador hasta la trampa del concentrador, se logra con una bomba de vacío (marca DKK), lográndose flujos de 20 mL/min.

Cromatógrafo de Gases

El análisis de COV PAMS se realiza en un cromatógrafo Hewlett Packard 6890 con un detector de Ionización de Flama (FID).

Las condiciones analíticas del instrumento son:

Gas Acarreador: Helio grado 5.0 (pureza 99.9990%).

Flujo de acarreador: 7.6 mL/min

Columna: GS-Alúmina de Agilent Technologies. 30 m x 0.53 mm

Rampa: 40°C por 4 min, 7°C/min a 190°C por 1 min, 4°C/min hasta 200°C por 22.43 min.

Temperatura del Detector: 275°C

Gas auxiliar: Helio (22 mL/min)

Flujo de Hidrógeno: 38 mL/min

Flujo de aire: 390 mL/min

Tiempo total de corrida: 55.3 min

El sistema analítico está enlazado a una computadora con el software CDS Plus (Chromat Data System, ver. 5.0 de LAssoft Ltd.) que controla al concentrador GAS-30, al cromatógrafo y si es el caso, al controlador del rack de cánisters. El programa CDS Plus proporciona un cromatograma al cual es necesario indicarle manualmente cuales son los picos de interés para su integración y que pueda calcular las áreas bajo la curva.

Las equivalencias de áreas bajo la curva y las concentraciones de cada analito, se determinan mediante curvas de calibración, que se elaboran inyectando varias concentraciones conocidas de los analitos COV PAMS y determinando la relación lineal entre las variables. Se considera correcta la curva de calibración cuando se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) mínimo de 0.99. Para realizar la calibración, se utiliza un gas estándar de 56 compuestos fabricado en Estados Unidos de América (PAMS 56 de Linde).

La composición del gas de calibración se muestra en la Tabla 4, a una concentración de 1 ppmV de cada analito en nitrógeno.

Una vez que se cuenta con los datos de integración de los cromatogramas, es posible, mediante las curvas de calibración, obtener los niveles de concentración de los PAMS en aire ambiente, previa aplicación, si es el caso, de los factores de dilución pertinentes.

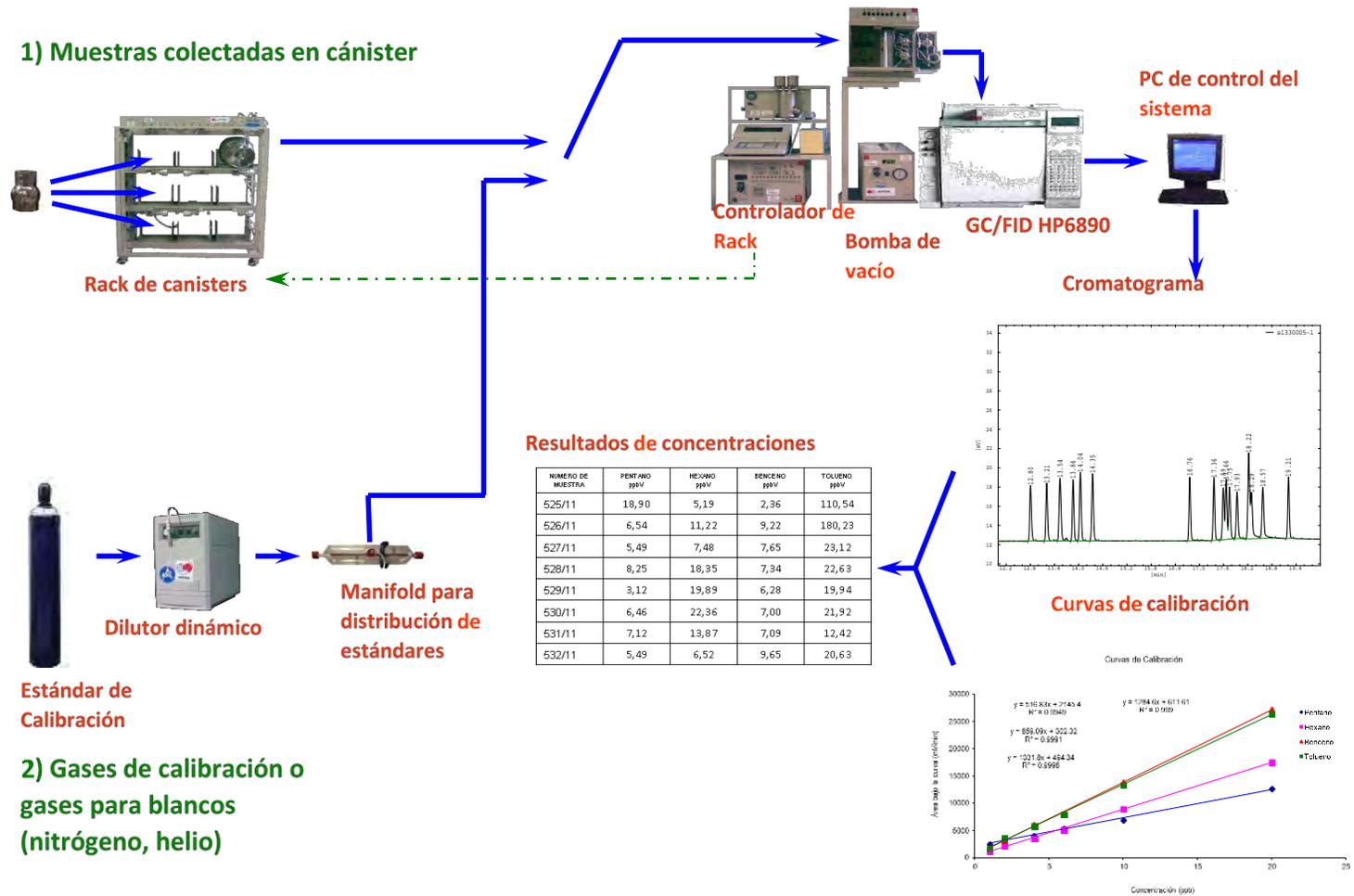


Figura 4. Esquema del sistema analítico de hidrocarburos precursores de ozono (PAMS) en el laboratorio de COV del INECC. Existen dos posibilidades de entrada: muestras colectadas en cánister, y gases de calibración y blancos

Tabla 4. Especies químicas fotorreactivas del gas de calibración PAMS

1.- etileno	21.- 3-metilpentano	41.- <i>o</i> -xileno
2.- acetileno	22.- 2-metil-1-penteno	42.- <i>m</i> -xileno
3.- etano	23.- <i>n</i> -hexano	43.- <i>p</i> -xileno
4.- propileno	24.- Metilciclopentano	44.- <i>n</i> -nonano
5.- propano	25.- 2,4-dimetilpentano	45.- isopropilbenceno
6.- isobutano	26.- benceno	46.- propilbenceno
7.- 1-buteno	27.- ciclohexano	47.- 2-etiltolueno
8.- <i>n</i> -butano	28.- 2-metilhexano	48.- 3-etiltolueno
9.- <i>trans</i> -2-buteno	29.- 2,3-dimetilpentano	49.- 4-etiltolueno
10.- <i>cis</i> -2-buteno	30.- 3-metilhexano	50.- 1,2,4-trimetilbenceno
11.- isopentano	31.- 2,2,4-trimetilpentano	51.- 1,2,3-trimetilbenceno
12.- 1-penteno	32.- <i>n</i> -heptano	52.- 1,3,5-trimetilbenceno
13.- <i>n</i> -pentano	33.- metilciclohexano	53.- <i>n</i> -decano
14.- 2-metil-1,3-butadieno	34.- 2,3,4-trimetilpentano	54.- <i>m</i> -dietilbenceno
15.- <i>trans</i> -2-penteno	35.- tolueno	55.- <i>p</i> -dietilbenceno
16.- <i>cis</i> -2-penteno	36.- 2-metilheptano	56.- <i>n</i> -undecano
17.- 2,2-dimetilbutano	37.- 3-metilheptano	
18.- Ciclopentano	38.- <i>n</i> -octano	
19.- 2,3-dimetilbutano	39.- etilbenceno	
20.- 2-metilpentano	40.- estireno	

Al igual que en la determinación de COV PAMS, el sistema analítico TO15 tiene dos posibles entradas de gases:

- 1) Muestras colectadas en cánisters
- 2) Gases estándar para calibración o gases para blancos (nitrógeno o helio).

Estas dos entradas ya han sido explicadas en la sección de análisis de COV PAMS. En la Figura 5 se muestra el esquema de análisis de COV mediante el método TO15 por cromatografía de gases realizado en el Laboratorio de COV del INECC.

Los dos tipos de muestras (tomadas en cánisters o estándares para calibración), pueden ingresar al sistema analítico mediante un rack de cánisters (marca Entech, modelo Autosampler 7016CA). El Rack tiene capacidad para 16 conexiones y es controlado por un equipo de preconcentración.

Preconcentrador

El Laboratorio de COV cuenta con un preconcentrador marca Entech, modelo 7100A. Es un equipo que tiene por objetivo el enriquecimiento de los analitos en muestras ambientales, que normalmente se encuentran en concentraciones muy bajas, en partes por billón en volumen (ppbV). La concentración de las muestras se realiza mediante un proceso de micropurga y trampa que incluye el enfriamiento con nitrógeno líquido a temperaturas del orden de los 150°C bajo cero. Posteriormente la muestra es purgada con helio para eliminar la humedad y el bióxido de carbono y capturada en trampas con materiales adsorbentes. Posteriormente se inyecta al cromatógrafo de gases para su análisis posterior.

Cromatógrafo de Gases

El análisis de COV tóxicos se realiza en un cromatógrafo Agilent 6890N acoplado a un espectrómetro de masas 5975B (Detector selectivo de masas o MS).

Las condiciones analíticas del instrumento son:

Gas Acarreador: Helio grado 5.0.

Columna: DB-5ms (marca J&W) de 60 m x 0.32 mm x 1 µm

Rampa: 35°C por 5 min, 6°C/min hasta 140°C por 0 min, 15°C/min hasta 220°C por 5 min. (Tiempo de corrida: 32.83 min.)

Presión de salida: 3.8 psi.

Temperatura: 200°C

Presión: 14.7 psig

Espectrómetro de Masas (MS):

Flujo de helio: 1.0 mL/min

Temperatura de la fuente: 230°C

Temperatura del cuadrupolo: 150°C

Temperatura del auxiliar: 230°C

Modo: Scan

Sintonía: BFB (1-bromo-4-fluorobenceno)

El sistema analítico está enlazado a una computadora con el software ChemStation de Agilent que controla al cromatógrafo. El preconcentrador y el rack se controlan mediante su propio software. Ambos programas trabajan juntos para controlar el sistema analítico completo.

El programa ChemStation proporciona los cromatogramas y en el caso del MS el espectro iónico. El sistema cuenta con una librería para realizar la comparación de espectros de los compuestos analizados con referencias para establecer la identidad.

Las equivalencias de áreas bajo la curva y las concentraciones de cada analito, se determinan mediante curvas de calibración, que se elaboran inyectando varias concentraciones conocidas de los analitos TO15 y determinando la relación lineal entre las variables. Se considera correcta la curva de calibración cuando se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) mínimo de 0.99. Para realizar la calibración, se utiliza un gas estándar TO15 de 65 compuestos marca Spectra (Linde Gas North America LLC), atendiendo solamente a los COV PAMS.

Las muestras colectadas en el Valle de Toluca fueron evaluadas por los métodos TO14A y TO15. Para cada analito se muestra en el Anexo 1, el tipo de método que se utilizó. En el caso de la Ciudad de México, la muestra y análisis de ésta se realizó en línea, es decir cada hora, mediante el método TO14A para todos los compuestos.

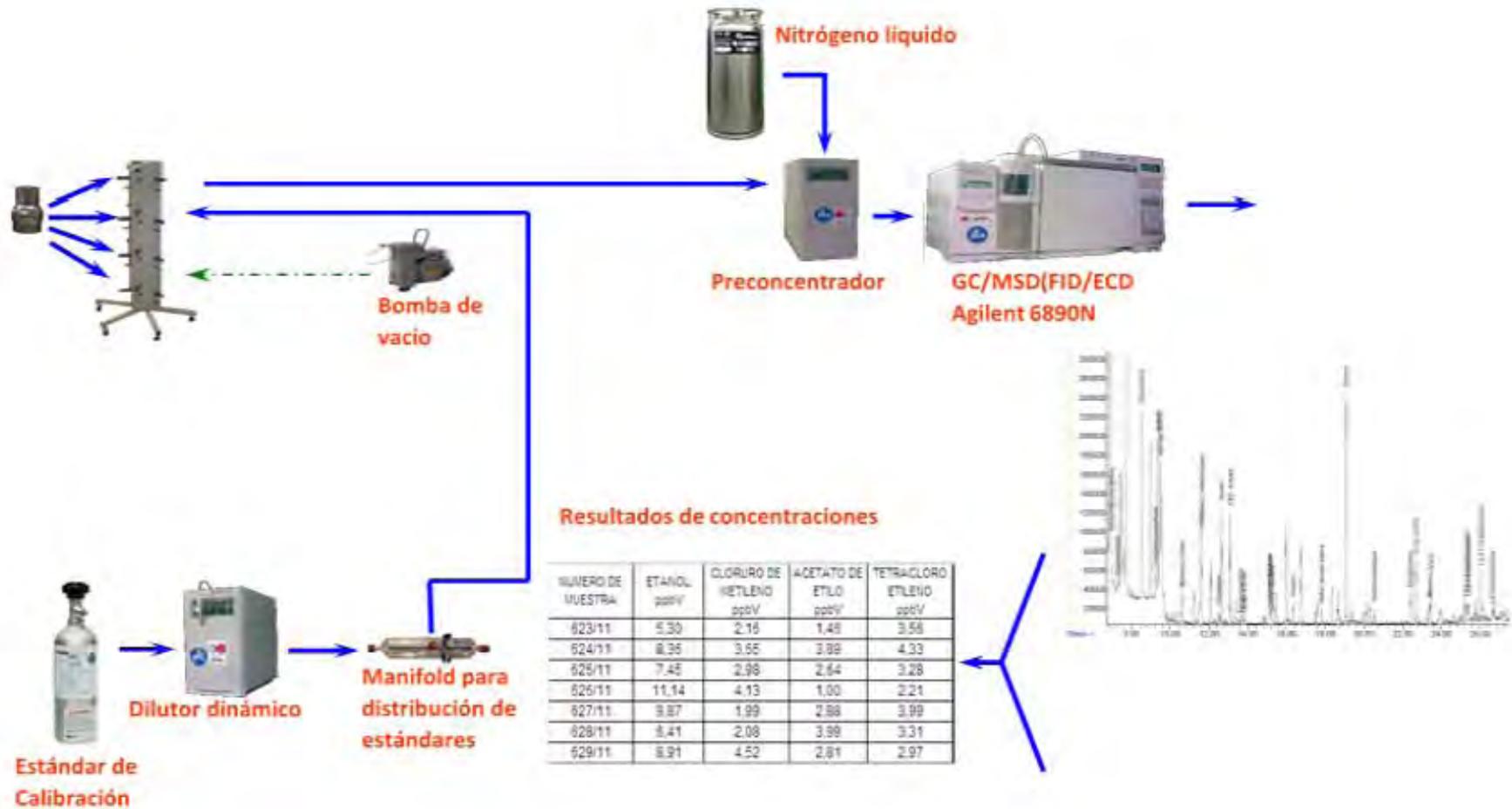


Figura 5. Esquema del sistema analítico del método TO15 de la USEPA en el laboratorio de COV del INECC

Límites de cuantificación y diferencia porcentual relativa por compuesto.

En el presente estudio se evaluaron los límites de detección inferior a partir del análisis de blancos de laboratorio y se calcularon los límites de cuantificación a partir de éstos en correspondencia con el primer punto con capacidad de ser cuantificado en las curvas de calibración. Los límites de cuantificación inferior por compuesto se presentaron menores a 1 ppb, con excepción de la 2-butanona y el tolueno que tuvieron registros de 2.2 y 1.04 ppb, respectivamente. Cada uno de los límites de cuantificación inferior de los 49 compuestos se observan en el Anexo 1.

La diferencia porcentual relativa (DPR) se obtuvo a partir del análisis de muestras reales duplicadas para su cuantificación, con la finalidad de conocer parte de la incertidumbre que se asocia desde la preparación de los medios del muestreo hasta el análisis instrumental en laboratorio.

La mayoría de los COV tuvieron una diferencia menor al 10%. Solamente los compuestos: n-hexano, etilbenceno, p-xileno, o-xileno e isopreno sobrepasaron dicho porcentaje, con desviaciones de 12.7, 11.8, 11.2, 13.5 y 10.3%, respectivamente. Los valores DPR para cada compuesto se enlistan en el Anexo 1.

No fueron detectados en las muestras duplicadas los siguientes compuestos: estireno, 1-etil-4-metil benceno, 1,3,5-trimetil benceno, 1,2,4-trimetilbenceno, MTBE y 2-butanona.

Análisis de Resultados

Las concentraciones obtenidas en unidades de partes por billón en volumen (ppbV) por especie química se conformaron en una hoja de cálculo ordenados por sitio y por fecha de muestreo (Anexos 2 y 3).

A partir de la concentraciones expresadas en ppbV de cada compuesto, se calcularon las concentraciones multiplicadas por el número de carbonos en su molécula, descrito en el Anexo 1, dando como resultado concentraciones en partes por billón de carbono (ppbC), con la finalidad de sumar las COV por grupos o conjuntos de compuestos que representan indicios de fuentes de emisión (Garzón et al., 2015), de la siguiente manera:

Grupos definidos

- 2-6S, alcanos de 2 a 6 carbonos saturados o parafinas, con excepción de gases del GLP
- 2-6N, hidrocarburos insaturados, alquenos más acetileno, con excepción de isopreno
- 7-9S, alcanos de 7 a 9 carbonos saturados
- OH-HC, hidrocarburos oxigenados
- Aromáticos, compuestos con anillo aromático
- GLP, alcanos específicos del gas LP, propano, butano e isobutano
- Biogénico, isopreno como indicador de emisiones naturales

Los registros de temperatura y presión atmosférica, necesarios para obtener las concentraciones de COV en microgramos por metro cúbico, se obtuvieron de las unidades de monitoreo móviles automáticas involucradas en este estudio, al Sur y Centro y de la Estación Fija de la Red de Monitoreo Local, San Cristobal, localizada al Norte del Valle de Toluca.

Así mismo se adquirieron de dichas estaciones de muestreo, los parámetros de gases contaminantes criterio y velocidad y dirección de vientos del sitio, éstos últimos para la elaboración de rosas de vientos.

Se compararon, para cada compuesto, las concentraciones de cada sitio y de cada región evaluando contrastes estadísticos con pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y de Mann-Whitney.

Se realizaron análisis de correlación de Pearson entre todos los compuestos determinados en laboratorio.

Se calculó la reactividad de cada especie química, utilizando los coeficientes de reacción con el radical OH de la atmósfera.

El radical OH en la atmósfera se estima que tiene una media global de 106 moléculas cm^{-3} (Seinfeld y Pandis 2006). La reactividad con OH para una especie COV es el producto de la concentración de COV y la velocidad de reacción de ese COV específico con el radical OH. Esta reacción es de segundo orden, con su coeficiente k_{OH} en unidades de $\text{cm}^3 \text{molécula}^{-1} \text{s}^{-1}$.

El valor de reactividad de OH se da en unidades de s^{-1} , dando una tasa de consumo de OH para cada COV presente en las muestras (Sinha et al., 2012).

Los coeficientes de kOH utilizados en este estudio se obtuvieron de la literatura (Atkinson, 1997; Atkinson y Arey, 2003), que se muestran para cada compuesto en el Anexo 1).

La fórmula utilizada es como sigue:

$$\text{Reactividad [OH]} = [\text{COV}_i] K_{\text{OH}(\text{COV})_i}$$

Donde la reactividad [OH] se presenta en unidades de s^{-1}
[COV_i] es la concentración de la especie química i, expresada en molécula por centímetro cúbico y

$K_{\text{OH}(\text{COV})_i}$ es el coeficiente de degradación del radical OH, expresado en $\text{cm}^3 \text{molecula}^{-1} \text{s}^{-1}$ para la especie química i

Se obtuvo la contribución por familia del potencial de formación de ozono, mediante el coeficiente de máxima reactividad incrementada (MIR, por sus siglas en inglés) conforme a Carter (1994, 2010). Los coeficientes MIR para cada compuesto se muestran en el Anexo 1.

La escala de reactividad incrementada se basa en la masa de ozono adicional formada por masa de COV añadido a las emisiones, para diversos compuestos bajo diversas condiciones atmosféricas, dado un mecanismo químico para los COV y otras especies atmosféricas, modelado para diversas condiciones atmosféricas (Carter, 1994, 2010).

La fórmula utilizada se resuelve como:

$$\text{FPO} = \text{MIR} \times \text{COV}_i,$$

FPO es la formación potencial de ozono

MIR, es el coeficiente de formación de ozono de máxima reactividad incrementada
COV_i es la concentración promedio de la especie "i" en la clase COV, expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Que es lo mismo que

$$FPO = \frac{1}{M_{O_3}} \sum MIR_i Y_i M_i$$

Donde FPO, es la formación potencial de ozono expresado en ppb

M_{O_3} es el peso molecular de ozono en g/mol

MIR_i es el coeficiente de máxima reactividad incrementada (g O₃/ g COV_i)

Y_i es la concentración del COV_i en ppb

M_i es el peso molecular del COV_i en g/mol

Se llevó a cabo la técnica de estadística multivariada de análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), que conforma variables que agrupan por correlación a las especies químicas, de los datos reunidos para el Valle de Toluca y para los datos de la Ciudad de México en Iztapalapa. El PCA identifica un menor número de factores ortogonales que explican la varianza de los datos (Hopke, 1985).

Para la evaluación de aporte de fuentes, se utilizó uno de los modelos receptor ampliamente utilizado en mezclas gaseosas y particuladas mediante el análisis de componentes principales de puntajes absolutos con análisis de regresión múltiple (PCA/APCS – MLR, por sus siglas en inglés) basado en Thurston y Spengler (1985) y utilizado para compuestos orgánicos volátiles por Duan et al. (2008).

Esta técnica de análisis multivariado factorial parte inicialmente de la correlación múltiple entre variables haciendo una reducción de factores, seleccionando los autovectores que explican la mayor parte de la varianza de los datos de las especies químicas de los compuestos orgánicos volátiles en este estudio.

Con este procedimiento se obtienen los factores que minimizan la longitud euclidiana de los residuales entre las concentraciones observadas y reconstruidas por el modelo de regresión múltiple por mínimos cuadrados. La reducción de dimensiones de variables a pocos factores o componentes principales define a las fuentes de emisión potenciales, como se describe en las siguientes ecuaciones.

$$APCS_{jk} = (P_{jk} - (P_0)_{jk}) \quad (j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$X_i = \sum_{j=1}^p b_{ji} APCS_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

Donde $APCS_{jk}$ son los puntajes absolutos obtenidos del análisis de componentes principales para las variables analizadas P_{jk} y por su parte $(P_0)_{jk}$ se refiere al puntaje de la introducción de la variable considerada como concentración estandarizada restada de cero para evitar resultados negativos, de un factor j de una medición k.

$b_{ji} APCS_j$, representan la contribución de las fuentes potenciales de emisión a la concentración X_i de compuestos orgánicos volátiles.

Así mismo también se realizaron análisis de cocientes de interespecies de los compuestos aromáticos BTEX, dado que tales compuestos tienen diferentes tasas de degradación, su relación entre ellos proporciona indicios de las fuentes de emisión y grado de envejecimiento o permanencia y transporte de las masas de aire (Liu et al., 2008).

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los sitios de muestreo del Valle de Toluca: San Antonio La Isla, Tollocan (cercano a la zona urbana de la Ciudad de Toluca) y Villa Cuauhtémoc, así como en Iztapalapa en la Ciudad de México se registraron a las horas de la toma de muestra, entre las 7 y 10 de la mañana, vientos leves en promedio con intensidades de 0.9 a 1.2 m/s. Tollocan presentó la humedad relativa más baja de 56.1% y los demás sitios estuvieron entre 62 y 65%, éste último corresponde a San Antonio La Isla. La presión barométrica es correspondiente a la altitud que tienen por su elevación con respecto al nivel del mar, entre 0.7 para el Valle de Toluca y 0.8 atmósferas para Iztapalapa en la Ciudad de México. Los vientos dominantes se registraron en el Valle de Toluca en San Antonio la Isla del Norte y Noreste; en Tollocan del Sur y Sureste y del Norte en Villa Cuauhtémoc, así mismo, para Iztapalapa en la Ciudad de México los vientos prevalecieron del Norte a las horas del estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros meteorológicos registrados en los sitios de estudio

Parámetro	Valle de Toluca			Ciudad de México
	San Antonio La Isla	Tollocan	Villa Cuauhtémoc	Iztapalapa
Temperatura (°C)	11.8	10.3	11.5	13.0
Humedad (%)	64.8	56.1	61.5	64.3
Presión barométrica (atm)	0.7	0.7	0.7	0.8
Velocidad de viento (m/s)	0.9	1.0	1.0	1.2
Dirección de viento dominante	N, NE	S, SE	NE	NE

Análisis estadístico descriptivo de los compuestos orgánicos volátiles

Se determinaron 43 especies químicas de compuestos orgánicos volátiles (COV) por cromatografía de gases, de 35 muestras tomadas en el Valle de Toluca y 36 COV de 28 muestras de la Ciudad de México en la Delegación Iztapalapa. Las concentraciones de COV obtenidas en cada muestra obtenida en los diferentes sitios de este estudio, se observan para el Valle de Toluca en el Anexo 2 y para Iztapalapa en la Ciudad de México, en el Anexo 3).

La suma de los COV totales expresados en ppbC fue mayor en Iztapalapa en la Ciudad de México con 1054.5 ppbC, seguido por Tolloca 735 ppbC, Villa Cuauhtémoc 275.6 ppbC y San Antonio La Isla con 213.2 ppbC.

Los COV agrupados por alcanos saturados de 2 a 6 carbonos (2-6S), con excepción de los compuestos del gas LP; alcanos insaturados de 2 a 6 carbonos (2-6N); compuestos del gas licuado a presión (GLP); alcanos de 7 a 9 carbonos (7-9S); hidrocarburos aromáticos (Arom); oxigenados (OCH) y un compuesto biogénico, se describen en la Tabla 6 asociando dichos grupos con las fuentes potenciales de emisión basados en diversos estudios enfocados a la evaluación del emisor al receptor.

Los grupos 2-6S, 2-6N y los compuestos oxigenados a grandes rasgos se atribuyen a emisiones de vehículos a gasolina y los aromáticos y oxigenados (OCH) en parte también; 7-9S se asocia principalmente a la quema de diésel, GLP son compuestos de fuga de gas LP de industrias, comercios, hogares y servicios y el único biogénico, el isopreno es emitido por la vegetación (Tabla 6).

Tabla 6. Grupos característicos de compuestos orgánicos volátiles asociados a fuentes potenciales de emisión

Grupo	Compuesto		Fuente potencial de emisión
2-6S	Etano	Ciclohexano	Emisiones de vehículos a gasolina (Jorquera y Rappengluck, 2004; Watson, Chow y Fujita, 2001)
	Ciclopentano	2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	
	Isopentano	3-metilpentano	
	n-pentano	n-hexano	
2-6N	Etileno	1-buteno	Industria petroquímica y emisiones de vehículos (Parrish et al., 2012; Schmitz, Hassel y Weber, 2000)
	Propileno	c-2-buteno	
	Acetileno	1-penteno	
	t-2-buteno	1-hexeno	
GLP	Propano	Isobutano	Fugas de gas licuado presurizado (Blake and Rowland, 1995; Wöhrnschimmel et al., 2010)
	n-butano		
7-9S	metilciclohexano	3-metilheptano	Emisiones de vehículos a diesel (Ogawa y Li, 2011)
	2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano	2-metilheptano	
	n-heptano	n-octano	
	2,3,4-trimetilpentano	n-nonano	
Aromáticos	Benceno	o-xileno	Industria, emisiones de vehículos a gasolina y pintura a base de aceite (Zheng et al., 2013; Yuan et al., 2009)
	Tolueno	Estireno	
	Etilbenceno	1,3,5-trimetilbenceno	
	p-xileno	1,2,4-trimetilbenceno	
	m-xileno		
Oxigenados	MTBE		Emisiones de vehículos a gasolina (Guo y Murray, 2000)
	2-butanona		
Biogénico	Isopreno		Emisiones biogénicas (Lindfors y Laurila, 2000)

Conforme a la Tabla 7, de los tres sitios del Valle de Toluca y de Iztapalapa en la Ciudad de México, en el caso del Valle de Toluca el lugar denominado Tollocan cercano al Centro de Toluca, fue el más abundante de los lugares bajo estudio en el Estado de México. Los datos que conformaron la Tabla 7, se muestran en los Anexos 2 y 3.

La abundancia de COV se presentó como sigue.

Los alcanos saturados de 2 a 6 carbonos (2-6S), exceptuando a los componentes del gas LP, tuvieron el siguiente orden de abundancia, tanto en Tollocan como en Iztapalapa:

Etano > isopentano > 2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano > n-pentano > n-hexano > ciclopentano = 3-metilpentano > ciclohexano

Para el sitio San Antonio La Isla: Etano > isopentano > n-pentano > 2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano > n-hexano > ciclopentano = 3-metilpentano > ciclohexano

Para el Sitio Villa Cuauhtémoc: Etano > isopentano > n-pentano > 2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano > n-hexano > 3-metilpentano > ciclopentano > ciclohexano

Las olefinas y acetileno correspondientes a hidrocarburos de 2 a 6 carbonos no saturados, exceptuando al isopreno tienen el orden:

Para Tollocan: Etileno > Acetileno > Propileno > c-2-buteno > 1-buteno > t-2-buteno > 1-hexeno > 1-penteno

Para San Antonio La Isla: Etileno > Acetileno > Propileno > 1-buteno > t-2-buteno > c-2-buteno = 1-hexeno = 1-penteno

Para Villa Cuauhtémoc: Etileno > Acetileno > Propileno > 1-buteno = 1-penteno > t-2-buteno > c-2-buteno > 1-hexeno

Para Iztapalapa: Etileno > Acetileno > Propileno > 1-buteno > t-2-buteno > 1-penteno > c-2-buteno > 1-hexeno

De los componentes del gas LP se obtuvo el siguiente orden de abundancia, en los cuatro sitios de monitoreo:

Propano > n-butano > isobutano

Los compuestos aromáticos tuvieron en el siguiente orden:

Para Tolloca: Tolueno > Benceno > Etilbenceno > o-xileno > 1,2,4-trimetilbenceno > m-xileno > p-xileno > 1,3,5-trimetil benceno > Estireno

Para San Antonio La Isla: Tolueno > Benceno > Etilbenceno > Estireno > o-xileno = 1,2,4-trimetilbenceno > m-xileno > p-xileno > 1,3,5-trimetil benceno

Para Villa Cuauhtémoc: Tolueno > Benceno > Etilbenceno > o-xileno = m-xileno 1,2,4-trimetilbenceno > Estireno > p-xileno > 1,3,5-trimetil benceno

Para Iztapalapa: Tolueno > Etilbenceno > Benceno > m-xileno > p-xileno y los demás no fueron detectados

De los hidrocarburos oxigenados evaluados en el Valle de Toluca, 2-butanona fue mayor a MTBE. En la Ciudad de México, éstos no se cuantificaron.

Los compuestos orgánicos Volátiles saturados de cadena de 7 a 9 carbonos tuvieron el siguiente orden:

Para Tolloca: 2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano > n-heptano > metilciclohexano = 2,3,4-trimetilpentano = 3-metilheptano > n-octano > n-nonano > 2-metilheptano

Para San Antonio La Isla: 2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano > 2,3,4-trimetilpentano = n-heptano = metilciclohexano = 3-metilheptano = n-octano = n-nonano = 2-metilheptano

Para Villa Cuauhtémoc: 2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano > 2,3,4-trimetilpentano > n-heptano = metilciclohexano > 3-metilheptano = n-octano n-nonano = 2-metilheptano

Para Iztapalapa: 2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano > 2,3,4-trimetilpentano > 3-metilheptano > n-heptano > metilciclohexano = n-octano > n-nonano = 2-metilheptano

En cuanto al isopreno, la media de la Ciudad de México es más del doble de Tollocan y Villa Cuauhtémoc del Valle de Toluca.

De los COV evaluados 12 de éstos representan la mayor proporción de la composición total, el 85% para Iztapalapa, 64% para Tollocan y tanto para San Antonio La Isla y Villa Cuauhtémoc fue del 61% en ambos.

Estos compuestos son: propano, n-butano, etileno, tolueno, acetileno, etano, isobutano, propileno, isopentano, etilbenceno, 2,3-dimbutano + 2-metpentano y n-pentano, que son emitidos por diversas fuentes tales como el gas LP, combustión de la gasolina y emisiones evaporativas (Tabla 6). Se observa particularmente que de los doce compuestos sólo el tolueno en el sitio Tollocan es similar a Iztapalapa y las demás especies químicas se mantuvieron por debajo de los niveles de Iztapalapa. Resalta que en Iztapalapa los niveles de concentración para propano fueron casi cuatro veces mayores a los registrados en Tollocan. San Antonio La Isla tuvo menores concentraciones que Villa Cuauhtémoc, ambos considerados semiurbanos por debajo siempre de Tollocan en el Valle de Toluca (Figura 6).

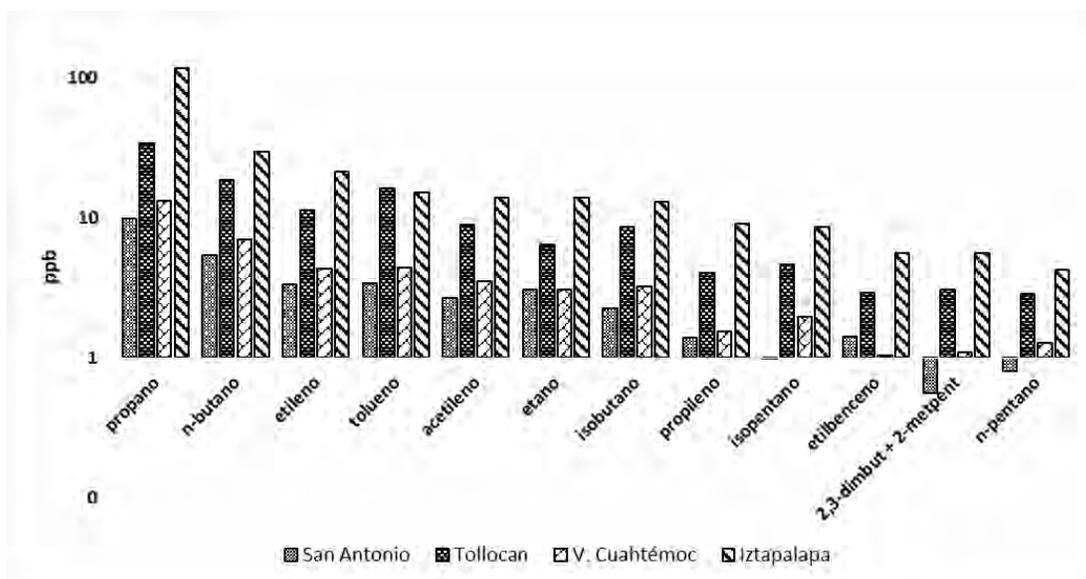


Figura 6. Concentración de COV de las doce especies químicas más abundantes de los sitios San Antonio La Isla, Tollocan y Villa Cuauhtémoc en el Valle de Toluca y en Iztapalapa en la Ciudad de México

Se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas, ANOVA de Kruskal Wallis demostrando que entre los sitios en los que se llevó a cabo el muestreo los niveles de concentración de los compuestos determinados, existen diferencias significativas ($p < 0.05$). Con la finalidad de encontrar en particular qué sitios son similares y cuáles son diferentes, se realizaron pruebas de contrastes para cada COV para compararse entre sitios, mediante la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, cuyos resultados de los 43 COV evaluados se observan en la Tabla 8.

La comparación del sitio Villa Cuauhtémoc y San Antonio La Isla, solamente presentan diferencias significativas en el compuesto 3-metilpentano.

Tollocan con Villa Cuauhtémoc y San Antonio La Isla no tienen diferencias significativas de etano, 1-penteno, isopreno, 2,3,4-trimetilpentano, etilbenceno y estireno. Adicionalmente con Villa Cuauhtémoc no tiene diferencias significativas de propano, isobutano, n-butano, n-pentano, ciclohexano, n-hexano y metilciclohexano.

Iztapalapa no tuvo diferencias significativas en isopreno, benceno y p-xileno con los sitios Villa Cuauhtémoc y San Antonio La Isla, y con Villa Cuauhtémoc tampoco con m-xileno.

Los sitios de Tollocan e Iztapalapa no tuvieron diferencias significativas en los compuestos acetileno, t-2-buteno, ciclopentano, c-2-buteno, n-pentano, 3-metilpentano, isopreno, 1-hexeno, metilciclohexano, 2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano, n-heptano, tolueno y m-xileno.

Tabla 7. Concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles (ppb) en tres sitios del Valle de Toluca y en un sitio de la Ciudad de México

Grupo	Compuesto	Valle de Toluca						Cd. México	
		San Antonio La Isla		Tollocan		Villa Cuauhtémoc		Iztapalapa	
		Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
2-6S	Etano	3.1	1.7	6.5	4.8	3.1	2.6	13.9	6.1
	Ciclopentano	0.3	0.2	1.3	0.9	0.4	0.3	2.1	1.5
	Isopentano	1.0	0.7	4.7	3.1	2.0	1.7	8.6	5.1
	n-pentano	0.8	0.5	2.9	2.0	1.3	0.9	4.3	2.5
	Ciclohexano	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	0.2	1.4	0.8
	2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	0.6	0.3	3.1	2.1	1.1	1.0	5.6	3.8
	3-metilpentano	0.3	0.0	1.3	0.8	0.6	0.3	2.1	1.4
	n-hexano	0.4	0.2	1.9	1.3	0.9	0.7	3.3	2.4
2-6N	Etileno	3.4	2.3	11.4	6.6	4.4	3.5	21.5	9.6
	Propileno	1.4	0.7	4.1	2.3	1.6	1.2	9.1	3.1
	Acetileno	2.7	1.9	9.0	5.4	3.5	2.7	14.0	8.8
	t-2-buteno	0.2	0.1	0.6	0.3	0.3	0.2	0.7	0.7
	1-buteno	0.3	0.1	0.9	0.4	0.4	0.3	4.2	1.5
	c-2-buteno	0.1	0.1	1.6	3.2	0.2	0.1	0.5	0.5
	1-penteno	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	0.6	0.2
	1-hexeno	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2
GLP	Propano	10.0	8.0	34.0	25.7	13.3	15.0	118.1	80.4
	Isobutano	2.3	1.3	8.7	9.6	3.2	3.3	13.1	8.6
	n-butano	5.5	3.2	18.9	21.8	7.0	7.9	29.7	18.7

Tabla 7 (Continuación). Concentraciones de Compuestos Orgánicos Volátiles (ppb) en tres sitios del Valle de Toluca y en un sitio de la Ciudad de México

Grupo	Compuesto	Valle de Toluca						Cd. México	
		San Antonio La Isla		Tollocan		Villa Cuauhtémoc		Iztapalapa	
		Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
7-9S	metilciclohexano	0.1	0.0	0.4	0.3	0.2	0.1	0.4	0.2
	2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano	0.4	0.2	1.3	0.8	0.5	0.2	2.1	1.6
	n-heptano	0.1	0.0	0.5	0.3	0.2	0.1	0.7	0.4
	2,3,4-trimetilpentano	0.2	0.0	0.4	0.4	0.3	0.2	1.2	0.9
	3-metilheptano	0.1	0.0	0.4	0.2	0.1	0.1	1.1	0.8
	2-metilheptano	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	n-octano	0.1	0.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	0.3
	n-nonano	0.1	0.0	0.2	0.2	0.1	0.0	0.3	0.2
Aromáticos	Benceno	1.6	0.7	5.0	1.9	1.8	1.2	1.7	0.7
	Tolueno	3.4	1.4	16.4	10.0	4.4	3.2	15.1	11.3
	Etilbenceno	1.4	1.3	2.9	3.2	1.0	1.3	5.6	1.8
	p-xileno	0.3	0.0	1.0	0.6	0.4	0.2	0.5	0.3
	m-xileno	0.5	0.3	1.7	1.7	0.9	0.6	1.2	0.6
	o-xileno	0.6	0.3	2.8	1.2	0.9	0.5	ND	ND
	Estireno	1.3	2.5	0.7	0.4	0.5	0.3	ND	ND
	1,3,5-trimetil benceno	0.2	0.2	0.9	0.6	0.3	0.2	ND	ND
	1,2,4-trimetilbenceno	0.6	0.1	2.6	0.5	0.8	0.1	ND	ND
Oxigenados	MTBE	1.4	0.7	6.9	2.7	2.3	1.8	ND	ND
	2-butanona	3.8	3.1	11.3	7.4	5.0	4.8	ND	ND
Biogénico	Isopreno	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5	1.2

ND.- No detectado

Tabla 8. Comparación estadística mediante la prueba de Mann-Whitney de los datos de COV entre pares de sitios en las cuatro localidades ($p < 0.05$)

Compuesto	Tollocan vs Villa Cuauhtémoc	Tollocan vs San Antonio La Isla	Tollocan vs Iztapalapa	Villa Cuauhtémoc vs San Antonio La Isla	Villa Cuauhtémoc vs Iztapalapa	San Antonio La Isla vs Iztapalapa
etano			*		*	*
etileno	*	*	*		*	*
propano		*	*		*	*
propileno	*	*	*		*	*
isobutano		*	*		*	*
n-butano		*	*		*	*
acetileno	*	*			*	*
t-2-buteno	*	*			*	*
1-buteno	*	*	*		*	*
ciclopentano	*	*			*	*
c-2-buteno	*	*			*	*
isopentano	*	*	*		*	*
n-pentano		*			*	*
1-penteno			*		*	*
ciclohexano		*	*		*	*
2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	*	*	*		*	*
3-metilpentano	*	*		*	*	*
n-hexano		*	*		*	*
isopreno						
1-hexeno	*	*			*	*
metilciclohexano		*			*	*
2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano	*	*			*	*
n-heptano	*	*			*	*

*.- Indica que hay diferencias significativas entre la comparación de pares de sitios

Tabla 8 (Continuación). Comparación estadística mediante la prueba de Mann-Whitney de los datos de COV en las cuatro localidades ($p < 0.05$)

Compuesto	Tollocan vs Villa Cuauhtémoc	Tollocan vs San Antonio La Isla	Tollocan vs Iztapalapa	Villa Cuauhtémoc vs San Antonio La Isla	Villa Cuauhtémoc vs Iztapalapa	San Antonio La Isla vs Iztapalapa
benceno	*	*	*			
2,3,4-trimetilpentano			*		*	*
3-metilheptano	*	*	*		*	*
2-metilheptano			*		*	*
n-octano	*	*	*		*	*
tolueno	*	*			*	*
n-nonano	*	*	*		*	*
etilbenceno			*		*	*
p-xileno	*	*	*			
m-xileno						*
o-xileno	*	*	NC		NC	NC
MTBE	*	*	NC		NC	NC
2-butanona	*	*	NC		NC	NC
estireno			NC		NC	NC
1-etil-4-metil benceno	*	*	NC		NC	NC
1,3,5-trimetil benceno	*	*	NC		NC	NC
1,2,4-trimetilbenceno	*	*	NC		NC	NC

*.- Indica que hay diferencias significativas entre la comparación de pares de sitios

NC.- No comparado, debido a que no fue determinado el análisis químico para Iztapalapa en la Ciudad de México

Análisis de correlación para los sitios del Valle de Toluca

Se presentan en esta sección las correlaciones de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de fuentes de emisión con respecto a todos los COV analizados. Las correlaciones completas entre todas las especies químicas, se observan en el Anexo 4.

Los compuestos del gas LP propano, butano e isobutano tienen correlación alta entre sí (≥ 0.8). El propano como indicador del gas LP mantiene correlación (≥ 0.7) con los alcanos, con excepción del 2-metilheptano y con el n-nonano y con las olefinas (≥ 0.8) como el etileno, propileno, t-2-buteno, 1-buteno y 1-hexeno y con el acetileno. También presenta correlación intermedia (0.7) con los aromáticos benceno, tolueno y o-xileno y con el compuesto oxigenado MTBE (Tabla 9). Se asocia al propano con el gas LP por supuesto y también con los compuestos derivados de la industria, combustión vehicular y emisiones evaporativas (Tabla 6).

De los compuestos alcanos saturados, estos se encuentran correlacionados entre sí, tomando como referencia al n-pentano, se observa que está relacionado (≥ 0.8) con los alcanos etano, isopentano, ciclopentano, 3-metilpentano, 2,3-dimetilbutano, n-hexano, metilciclohexano, 2,3-dimetilpentano, n-heptano, n-octano; con las olefinas etileno, propileno, t-2-buteno y 1-buteno y con el acetileno. Tiene correlaciones intermedias (0.7) con propano, 2,3,4-trimetilpentano, 3-metilheptano y con benceno (Tabla 9). El n-pentano se relaciona con emisiones vehiculares (Tabla 6).

Acetileno es un indicador de combustión que se correlaciona (≥ 0.8) de forma elevada con etano, propano, isopentano, n-pentano, ciclopentano, 3-metilpentano, n-heptano, 2,3,4-trimetilpentano, 3-metilheptano, n-octano, etileno, propileno, t-2-buteno, 1-buteno, 1-hexeno y benceno (Tabla 9). Puntualiza la quema de combustibles fósiles (Tabla 6).

En la Tabla 9, las olefinas etileno y propileno tienen correlación alta (≥ 0.8) con sus precursores etano y propano y con los alcanos isopentano, n-pentano, ciclopentano, 3-metilpentano, 2,3-dimetilbutano, n-hexano, 2,3-dimetilpentano, n-heptano, 3-metilheptano, n-octano, 1-buteno, 1-hexeno, acetileno y benceno, todos estos asociados con la quema de gasolina y gas LP (Tabla 6).

El isopreno de origen biológico no tiene correlación con ningún otro COV, lo mismo que el compuesto oxigenado 2-butanona y el aromático estireno (Tabla 9).

Los compuestos aromáticos tales como el benceno, tiene correlación de intermedia a alta (≥ 0.7) con etano, propano, isopentano, n-pentano, ciclopéntano, metilpentano, 2-3-dimetilbutano, n-hexano, 2,3-dimetilpentano, n-heptano, 3-metilheptano, n-octano, etileno, propileno, t-2-buteno, 1-buteno, 1-hexeno, acetileno, tolueno, o-xileno, 1-etil-4-metilbenceno, 1,3,5-trimetilbenceno, 1,2,4-trimetilbenceno y MTBE (Tabla 9). Potencialmente de emisiones vehiculares y de emisiones evaporativas (Tabla 6).

El tolueno procede de diversas fuentes de emisión, entre ellas del uso de disolventes (Tabla 6). Este compuesto presenta correlación alta (≥ 0.8) con benceno, o-xileno, 1,2,4-trimetilbenceno y con MTBE y en menor correspondencia (0.7) con propano, butano, isobutano y 2-3-dimetilbutano, asociados posiblemente con la industria que utiliza gas LP, que en sus procesos emplea disolventes (Tabla 9).

El compuesto oxigenado MTBE, que es un aditivo de la gasolina, tiene correlación intermedia con el isopentano, que es un compuesto indicador de la evaporación de gasolinas y presenta fuerte correlación (≥ 0.8) con el 2,3-dimetilbutano, benceno, tolueno, o-xileno, 1-etil-4-metilbenceno, 1,3,5-trimetilbenceno y 1,2,4-trimetilbenceno (Tabla 9), relacionado con la evaporación de la gasolina (Tabla 6).

Análisis de correlación para Iztapalapa en la Ciudad de México

Se presentan también en esta sección, las correlaciones de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de fuentes de emisión con el total de los COV analizados. Las correlaciones completas entre todas las especies químicas, se observan en el Anexo 5.

Los compuestos del gas LP propano, n-butano e isobutano tienen alta correlación entre sí (0.9-1.0). Propano tiene elevada correlación (≥ 0.8) con los alcanos, con excepción del metilciclopentano que es de 0.6 y con el n-nonano de 0.7; con las olefinas con excepción del 1-buteno, c-2-penteno y 1-hexeno; con acetileno y con los aromáticos benceno, etilbenceno y m-xileno, asociados con emisiones vehiculares (Tabla 6).

De los alcanos que provienen de emisiones vehiculares (Tabla 6), se tomó al n-pentano como indicador de dichas emisiones, que presenta correlación elevada (≥ 0.8) con los compuestos del gas LP y todos los alcanos con excepción del

metilciclohexano, con una correlación intermedia de 0.7; también tiene alta correlación con olefinas con excepción del 1-buteno, c-2-penteno, 1-hexeno e isopreno y con elevada correlación con los aromáticos benceno, etilbenceno y m-xileno (Tabla 10).

Las olefinas etileno y propileno, indicadores de emisiones vehiculares e industriales (Tabla 6) presentan correlación de media a alta (≥ 0.7) con los compuestos del gas LP y otros alcanos, con excepción del metilciclopentano, metilciclohexano y n-nonano; con otras olefinas t-2-buteno, c-2-buteno, 1-penteno, t-2-penteno y 1-hexeno; con el acetileno y con los aromáticos benceno, etilbenceno y m-xileno (Tabla 10).

La olefina biogénica isopreno sólo se correlaciona de forma intermedia con 1-penteno (0.7) (Tabla 10).

El acetileno indicador de combustión, se correlaciona de forma elevada con la mayoría de los alcanos, sólo con metilciclopentano se da de 0.6 y con n-nonano de 0.7, en todos los demás es ≥ 0.8 ; lo mismo que con las olefinas, con excepción 1-buteno, 1-hexeno e isopreno, con c-2-penteno es de 0.7. Con los compuestos aromáticos también es alta la asociación con benceno, etilbenceno y m-xileno (Tabla 10). Este compuesto se presenta por la combustión del gas LP y de las emisiones vehiculares.

De los compuestos aromáticos, el benceno (Tabla 10), presenta correlación alta (≥ 0.08) con todos los alcanos incluyendo a los del gas LP propano, butano e isobutano, con excepción del metilciclopentano; también se asocia fuertemente con las olefinas a excepción del 1-buteno, 1-penteno, c-2-penteno, 1-hexeno e isopreno. Este compuesto tiene también alta correlación con etilbenceno y m-xileno. Se observan asociaciones con emisiones industriales, emisiones evaporativas y vehiculares.

El tolueno no tiene correlación alta con ningún compuesto. Su correlación con m-xileno y p-xileno es de apenas 0.6, ello indica sobre la complejidad de la mezcla de fuentes de emisión, ya que el tolueno está presente en el uso y aplicación de disolventes (Tabla 6).

Tabla 9. Correlación de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de diversas fuentes de emisión del muestreo del Valle de Toluca

Compuesto	propano	n-pentano	etileno	propileno	acetileno	isopreno	benceno	tolueno	MTBE
etano	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.0	<u>0.7</u>	0.6	0.6
propano		<u>0.7</u>	0.9	0.9	0.9	0.2	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
n-butano	0.8	0.3	0.6	0.6	0.6	0.1	0.6	<u>0.7</u>	0.6
isobutano	0.8	0.4	0.6	0.6	0.6	0.1	0.6	<u>0.7</u>	0.6
isopentano	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.1	<u>0.7</u>	0.6	0.7
n-pentano	<u>0.7</u>		0.9	0.9	0.9	0.1	<u>0.7</u>	0.5	0.6
ciclopentano	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.1	0.8	0.6	<u>0.7</u>
3-metilpentano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.3	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>
2,3-dimetilbutano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.2	0.8	<u>0.7</u>	0.8
n-hexano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.3	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>
ciclohexano	0.8	0.6	0.6	<u>0.7</u>	0.6	0.3	0.5	0.4	0.6
metilciclohexano	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.3	0.6	0.5	<u>0.7</u>
2,3-dimetilpentano	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.3	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>
n-heptano	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.8	0.6	<u>0.7</u>
2,3,4-trimetilpentano	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.8	0.2	0.6	0.6	0.6
3-metilheptano	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.8	0.8	0.3	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>
2-metilheptano	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3
n-octano	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.3	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>
n-nonano	0.6	0.6	0.6	<u>0.7</u>	0.6	0.4	0.5	0.3	0.5
etileno	0.9	0.9		1.0	1.0	0.1	0.8	0.6	<u>0.7</u>
propileno	0.9	0.9	1.0		1.0	0.1	0.8	0.6	<u>0.7</u>
t-2-buteno	0.8	0.9	1.0	0.9	1.0	0.0	0.8	0.6	<u>0.7</u>
c-2-buteno	0.4	-0.1	0.2	0.2	0.3	-0.1	0.3	0.6	0.4
1-buteno	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.0	<u>0.7</u>	0.5	0.6
1-penteno	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2
1-hexeno	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.3	<u>0.7</u>	0.5	0.6
acetileno	0.9	0.9	1.0	1.0		0.0	0.8	0.6	<u>0.7</u>
isopreno	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0		0.0	-0.1	0.0
benceno	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.8	0.8	0.8	0.0		0.9	0.9
tolueno	<u>0.7</u>	0.5	0.6	0.6	0.6	-0.1	0.9		0.9
etilbenceno	0.6	0.2	0.4	0.4	0.4	-0.1	0.3	0.5	0.4
p-xileno	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.2	0.6	0.5	0.6
m-xileno	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.3	0.5	0.2	0.5
o-xileno	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.0	1.0	0.9	1.0
1-etil-4-metilbenceno	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.1	0.9	<u>0.7</u>	0.9
1,3,5-trimetilbenceno	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.9	<u>0.7</u>	0.9
1,2,4-trimetilbenceno	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.1	1.0	0.8	1.0
estireno	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0.4	-0.1	-0.1	-0.1
MTBE	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.0	0.9	0.9	
2-butanona	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.0	0.5	0.5	0.5

Tabla 10. Correlación de Pearson de compuestos orgánicos volátiles seleccionados como indicadores de diversas fuentes de emisión del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México

Compuesto	propano	n-pentano	etileno	propileno	acetileno	isopreno	benceno	tolueno
etano	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.2	0.9	0.4
propano		0.9	0.9	0.8	1.0	0.3	0.9	0.4
n-butano	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	0.3	0.9	0.4
isobutano	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	0.2	0.9	0.4
2,2-dimetilbutan	0.9	0.9	0.9	<u>0.7</u>	0.9	0.0	0.9	0.5
ciclopentano	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	0.2	0.9	0.3
isopentano	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	0.2	1.0	0.4
n-pentano	0.9		0.9	0.8	0.9	0.2	1.0	0.5
metilciclopentan	0.6	0.6	0.6	<u>0.7</u>	0.6	0.4	0.6	0.3
ciclohexano	0.8	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.9	-0.1	0.9	0.4
2,3-dimetilbutan	0.9	0.9	0.9	<u>0.7</u>	0.9	-0.1	0.9	0.5
3-metilpentano	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	0.2	0.9	0.4
n-hexano	0.9	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.9	0.1	0.8	0.4
metilciclohexano	0.8	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.8	0.1	0.8	0.4
2,3-dimetilpenta	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.1	0.8	0.5
n-heptano	0.8	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.9	0.1	0.9	0.5
2,3,4-trimetilpe	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.2	1.0	0.3
2-metilheptano	0.8	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.9	0.1	0.9	0.3
3-metilheptano	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.1	0.9	0.3
n-octano	0.8	0.9	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.1	0.9	0.3
isooctano	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	0.2	0.9	0.3
n-nonano	<u>0.7</u>	0.8	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>	0.1	0.8	0.4
etileno	0.9	0.9		0.9	0.9	0.2	0.9	0.4
propileno	0.8	0.8	0.9		0.8	0.2	0.8	0.3
t-2-buteno	0.9	0.9	0.8	<u>0.7</u>	0.9	0.2	0.9	0.3
c-2-buteno	0.9	0.9	0.9	<u>0.7</u>	0.9	0.1	0.9	0.3
1-buteno	-0.1	-0.1	0.2	0.4	-0.1	0.0	-0.2	0.0
1-penteno	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.3
t-2-penteno	0.8	0.9	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.1	0.9	0.4
c-2-penteno	0.6	0.6	0.6	0.5	<u>0.7</u>	0.1	0.6	0.3
1-hexeno	0.5	0.5	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.5	-0.3	0.5	0.4
acetileno	1.0	0.9	0.9	0.8		0.2	1.0	0.4
isopreno	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2		0.2	0.1
benceno	0.9	1.0	0.9	0.8	1.0	0.2		0.4
tolueno	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.1	0.4	
etilbenceno	0.8	0.9	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.2	0.9	0.5
p-xileno	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.0	0.6	0.2
m-xileno	0.9	0.9	0.9	<u>0.7</u>	1.0	0.1	0.9	0.4

Cada uno de los hidrocarburos fue multiplicado por el número de carbonos de su molécula con el fin de sumarlos por grupo, cuyos resultados se observan en la Tabla 11. Iztapalapa en la Ciudad de México muestra concentraciones 43% mayores que Tollocan en el Valle de Toluca. Por su parte las concentraciones observadas en Villa Cuauhtémoc y San Antonio La Isla, representan el 37 y 29% de las observadas en Tollocan, respectivamente.

El grupo más abundante en este estudio fue el GLP en Iztapalapa con 525.5 ppbC, seguido por los compuestos aromáticos en Tollocan 249.3 ppbC y el GLP en el mismo sitio con 212.2 ppbC y enseguida Iztapalapa mantuvo 2-6S, aromáticos y 2-6N con 177.3, 174.7 y 125.2 ppbC, respectivamente. Los demás registraron concentraciones mínimas. A este nivel de análisis se observa que las fuentes de emisión principales son aquellas derivadas de la combustión de gasolina y las fugas de gas licuado presurizado. Resalta que en todos los grupos que fueron registrados en ambas localidades, con excepción de los compuestos aromáticos, Iztapalapa prevaleció con mayores concentraciones que todos los sitios del Valle de Toluca (Figura 7).

Tollocan como sitio plenamente urbano, tiene niveles de concentración por grupo de la siguiente manera: parafinas de cadena corta y larga y las olefinas más acetileno suman el 55%, compuestos del gas LP el 40% e isopreno el 3%.

Tabla 11. Concentraciones de COV (ppbC) por grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Grupo	Valle de Toluca			Cd. de México
	Sn Antonio La Isla	Tollocan	Villa Cuauhtémoc	Iztapalapa
2-6S	25.7	98.0	41.9	177.3
2-6N	20.2	68.7	26.8	125.2
Gas LP	60.8	212.2	80.6	525.5
7-9S	9.6	27.1	12.7	49.4
Aromáticos	73.9	249.3	81.2	174.7
Oxigenados	22.4	79.6	31.6	
isopreno	0.7	0.8	0.8	2.3
Total	213.2	735.7	275.6	1054.5

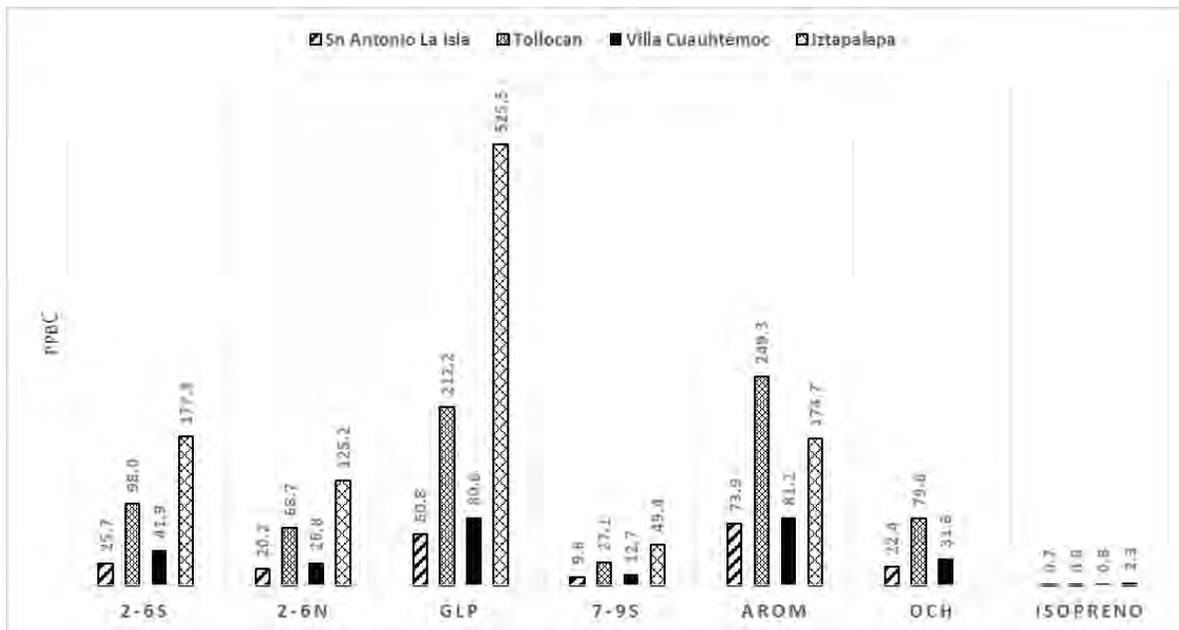


Figura 7. Concentración de COV por grupo de compuestos en las localidades del Valle de Toluca y al Oriente de la Ciudad de México en Iztapalapa

Se compararon los resultados de este proyecto con estudios de diferentes localidades del mundo. La Tabla 12 muestra el tipo de sitio muestreado: zonas prístinas o de fondo, rurales, semiurbanas, industriales y en avenidas.

COV seleccionados, característicos de los diferentes sitios indicados en la Tabla 12 se compararon como se muestran en la Figura 8. El propano como indicador de uso y distribución de gas LP se excede en la Ciudad de México en Iztapalapa con respecto a otras áreas urbanas e industriales, no así Tollocan que tiene una media cercana a otras áreas urbanas. n-pentano y propileno son marcadores químicos de la combustión de automotores. n-pentano en Iztapalapa se encuentra casi al doble que en Tollocan; ambos sitios muestran registros mayores que los otros muestreos realizados en avenidas y sitios urbanos. Sin embargo, en el caso de propileno la media de Iztapalapa está por encima de lo observado en avenidas de otros países, pero no así en Tollocan.

El acetileno muestra la quema de combustibles fósiles, en este caso Iztapalapa tiene niveles entre industriales y de avenidas, posiblemente con una contribución mixta de ambas fuentes; Tollocan confirma lo observado en campo, por su cercanía con la principal avenida para conectar con la Ciudad de México, presenta niveles de acetileno muy parecidos a las emisiones en avenidas.

Es importante señalar que de los compuestos aromáticos, tal como el benceno es de mayor importancia en Tollocan, pues su media supera a todos los ambientes con excepción de la media de emisiones industriales.

El isopreno, tanto en los sitios del Valle de Toluca como en Iztapalapa se tiene evidencia en esta comparación que su contribución es biogénica debido a que sus medias están por debajo de áreas, incluso de fondo, rurales y suburbana Figura 8.

Tabla 12. Referencias de análisis de COV en diferentes condiciones ambientales para comparar VOC seleccionados en este estudio

Referencia	Fondo	Rural	Suburbano	Urbano	Industrial	en Avenida
von Schneidemesser et al., 2010	•	•				•
Guo et al., 2007				•		
Li et al., 2017						•
Na et al., 2001				•	•	
Navazo, et al., 2008	•					
Sauvage et al., 2009		•				
Tang et al., 2007	•	•	•	•	•	•
Menchaca-Torre, Mercado-Hernández y Mendoza-Domínguez, 2015				•		
Velasco et al., 2007		•		•	•	
Saito, Nagao y Kanzawa, 2009				•		

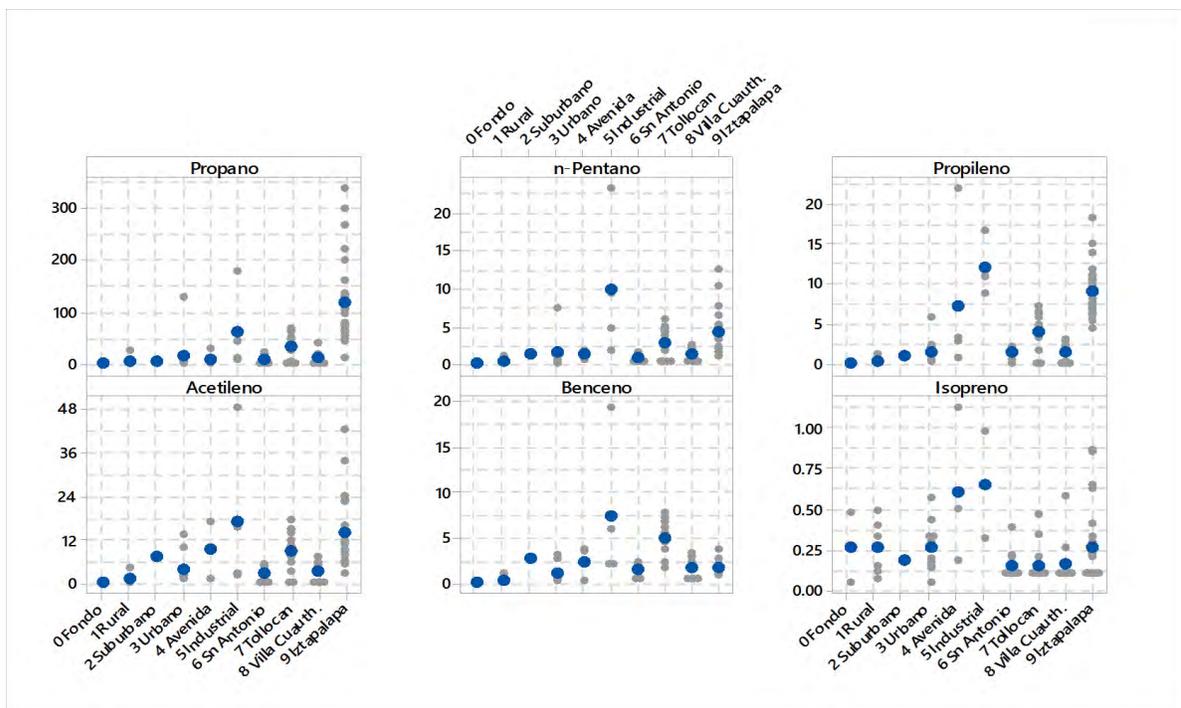


Figura 8. Comparación de COV (ppb) seleccionados por diversas fuentes de emisión con respecto a niveles de concentración obtenidos en otros estudios. El círculo obscuro representa la media

Evaluación de reactividad y formación potencial de ozono

De acuerdo a la estimación de la pérdida de radicales OH en la atmósfera por reacción con los COV, se observa que la Ciudad de México tiene una atmósfera 20% más reactiva que el sitio más crítico del Valle de Toluca (Tabla 13).

San Antonio La Isla y Villa Cuauhtémoc tienen una reactividad menor correspondiente al 34 y 39%, respectivamente, en comparación con Tollocan del Valle de Toluca.

Los compuestos aromáticos son relevantes en Tollocan en el Valle de Toluca al mismo nivel que las olefinas más acetileno. En Iztapalapa en la Ciudad de México son las olefinas más acetileno las de mayor aporte seguido del gas LP y los compuestos aromáticos. Según la Tabla 13, en el Valle de Toluca los máximos

contribuyentes a la formación de ozono son los aromáticos entre el 36 y 47% seguido por las olefinas más acetileno que aportan entre el 30 y 38% del total y el gas LP entre el 8 y 10%. En contraste con la Ciudad de México que el máximo aporte lo proporcionan las olefinas más acetileno con el 52% y posteriormente el gas LP con 18% y a los aromáticos se les atribuye el 13%.

Tabla 13. Estimación de la reactividad por degradación del radical OH (τ s) de cada grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Grupo	Valle de Toluca			Cd. de México
	Sn Antonio La Isla	Tollocan	Villa Cuauhtémoc	Iztapalapa
2-6S	0.4	1.9	0.8	3.4
2-6N	2.6	9.6	3.5	16.6
Gas LP	0.7	2.6	1.0	5.9
7-9S	0.2	0.6	0.3	1.0
Aromáticos	4.1	9.7	3.6	4.1
Oxigenados	0.2	0.8	0.3	
isopreno	0.4	0.4	0.4	1.2
Total	8.7	25.6	9.9	32.1

Otra forma de comparar la reactividad atmosférica es mediante la evaluación de la formación potencial de ozono utilizando los factores de máxima reactividad incrementada o índices de Carter (MIR, por sus siglas en inglés), que proporciona cálculos del máximo escenario debido a incrementos de masa de ozono por masa de incremento de COV, esta evaluación no sustituye sino complementa a la anterior, es quizás más prospectiva que valorativa, es decir que debe de interpretarse con precaución pues los mecanismos de reacción no forzosamente se llevan a cabo en la misma forma en localidades distintas con condiciones diferentes.

Así pues utilizando los índices de Carter, la formación de ozono basada en los COV evaluados en este estudio, presuponen la formación de 162 ppb en San Antonio La Isla, 600 ppb en Tollocan y 212 ppb en Villa Cuauhtémoc en el Valle de Toluca, y 684 ppb en Iztapalapa en la Ciudad de México. Es importante señalar que estas concentraciones no se observaron en los registros de las mediciones

de contaminantes criterio en ambas localidades, probablemente debido a la gran disponibilidad de NOx y a otros factores ambientales atenuantes. No obstante en términos generales, el cálculo máximo de formación de ozono, indica las fuentes probables que requieren de atención en la gestión de la calidad del aire.

En la Tabla 14, se observan los porcentajes a los cuales es atribuible la formación potencial de ozono. Para el Valle de Toluca no se obtienen las mismas sugerencias que la evaluación de degradación de radicales OH (Tabla 13). En particular comparando Tollocan e Iztapalapa para la formación de ozono, en Tollocan son los compuestos aromáticos los de mayor aporte (56%) seguido por las olefinas (27%) y luego el gas LP (9%) y en Iztapalapa son las olefinas las que propician en mayor medida la formación de ozono con 43%, seguido por los compuestos aromáticos (27%) y el gas LP (17%).

Tabla 14. Porcentaje de formación potencial de ozono para cada grupo característico en los cuatro sitios de muestreo

Grupo	Valle de Toluca			Cd. de México
	Sn Antonio La Isla	Tollocan	Villa Cuauhtémoc	Iztapalapa
2-6S	5.6	6.3	7.5	9.7
2-6N	27.5	26.6	27.9	42.6
Gas LP	9.6	9.1	9.7	16.7
7-9S	2.0	1.6	2.1	2.5
Aromáticos	53.9	56.0	51.6	27.4
isopreno	1.4	0.4	1.1	1.0

Contribución de fuentes potenciales de emisión

La relación entre las concentraciones (peso/peso) de los COV aromáticos benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, son indicadores de fuentes de emisión y también proporcionan información acerca de la edad o residencia de las masas de aire.

El cociente de tolueno/benceno con valores entre 1.5-4.3 se han reportado que reflejan a las fuentes móviles (Hoque et al., 2008; Liu et al., 2009), e incluso como

una generalidad basada en múltiples estudios por debajo de 3. En la Tabla 15 se observan registros menores a 4 en los sitios del Valle de Toluca, indicando que las emisiones vehiculares tienen contribución en la localidad, en contraste con Iztapalapa de la Ciudad de México que tiene un factor de más de tres veces mayor, esto atribuible a más fuentes de emisión que se suman a las emisiones de los automóviles, probablemente industriales, de comercios y servicios.

Por otro lado el cociente de xilenos/etilbenceno se ha utilizado como indicador de la edad de las parcelas de aire de COV (Guo et al., 2004; Guo, Wang y Louie, 2004; Elbir et al., 2007; Hsieh et al., 2011), debido a que los xilenos son los más reactivos de los BTEX y también entre los COV de importancia fotoquímica. Cocientes con valores alrededor de tres indican la presencia de vapores de emisión reciente. Los cocientes obtenidos en este estudio muestran que los sitios del Valle de Toluca son denominadas emisiones frescas, en tanto que en Iztapalapa en la Ciudad de México presentó un bajo cociente por lo que fueron acumuladas probablemente producto de las emisiones generadas el día anterior o bien producto del transporte de masas de aire (Tabla 15).

Tabla 15. Cocientes de BTEX de los cuatro sitios de muestreo en el Valle de Toluca y Ciudad de México

Localidad	tolueno/benceno	mp-xilenos/etilbenceno
San Antonio La Isla	2.83	1.74
Tollocan	3.78	2.02
Villa Cuauhtémoc	2.72	2.50
Cd. Mex. Iztapalapa	10.44	0.29

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos año base 2008 de las localidades bajo estudio, se obtuvo de las bases de datos del Gobierno Federal del Sistema de Inventarios de Emisiones a la Atmósfera (SINEA) (<http://sinea.semarnat.gob.mx/>, consultado el 2 de junio de 2017), cuya estimación incluye a los compuestos orgánicos volátiles, se presentan agregados por fuente en la Tabla 16. En esta se observa que los Municipios de San Antonio La Isla y el de Otzolotepec en Villa Cuauhtémoc, el aporte de COV es poco significativo en su contribución a la región del Valle de Toluca, siendo para estos municipios las fuentes de área las de mayor contribución.

El Municipio de Toluca con respecto a la Ciudad de México, supera las emisiones de COV en un 92%. Los COV derivados de las fuentes de área en Toluca son el 88% de los reportados en Iztapalapa y los derivados de fuentes móviles son 3.67 veces mayores en Toluca que en Iztapalapa.

Tabla 16. Inventario de emisiones de COV en los Municipios de los sitios de muestreo en el Valle de Toluca del Estado de México y de la Delegación Iztapalapa en la Ciudad de México (toneladas/año)

Fuentes	San Antonio La Isla	Toluca	Otzolotepec-Villa Cuauhtémoc	Iztapalapa-Cd. México
Area	222.2	17,545.1	666.1	19,954.2
Fijas	0.1	4,069.0	0.0	5,097.0
Móviles	6.4	55,677.8	59.8	15,173.3
Naturales	2.1	38.3	4.1	129.2
Total	230.9	77,330.1	730.0	40,353.7

Una de las formas de conocer la incertidumbre de los inventarios de emisión se basa en metodologías de arriba hacia abajo (top-down), es decir relacionando cocientes entre contaminantes atmosféricos (Fujita et al., 1992).

En el presente estudio se relacionaron las mediciones de COV y de NO_x, estas últimas tomadas de los registros de estaciones de Unidades Móviles localizadas en los sitios San Antonio La Isla y Tollocan, y mediciones automáticas de la estación fija San Cristobal, localizada al Norte del Valle de Toluca para utilizar sus datos con los registros de COV de Villa Cuauhtémoc.

Los cocientes de las mediciones COV/NO_x se compararon con los cocientes COV/NO_x del inventario de emisiones agregado por fuente, se muestran en la Tabla 17. Es importante señalar que estos resultados se deben tomar con reserva debido al bajo número de muestras obtenidas, así mismo la información del inventario de emisiones no fue corregida para el horario y temporada en la que se realizó este estudio.

Para San Antonio La Isla y Villa Cuauhtémoc aparenta estar sobrestimado el inventario de emisiones por mucho, no así las áreas urbanas como Tollocan que tiene un exceso del 17% y la Ciudad de México en Iztapalapa con una subestimación del 8%, esto último contrasta con los resultados históricos evaluados para el Área Metropolitana de la Ciudad de México en las campañas de mediciones del Instituto Mexicano del Petróleo de 1992 a 2001 (Arriaga-Colina et al., 2004), que describe un factor de 2.3 a 2.8 de discrepancia de 6 a 9 am con respecto al Inventario de Emisiones de 1998.

Los resultados del cociente de COV/NOx en este estudio de acuerdo con Sillman (1999) confirman que tanto la atmósfera del Valle de Toluca como la de Iztapalapa en la Ciudad de México, la formación de ozono está dominada por los COV al ser estos cocientes menores a 10 (Tabla 17).

Tabla 17. Discrepancia entre el Inventario de Emisiones y las mediciones realizadas en los sitios de muestreo del Valle de Toluca y en Iztapalapa en la Ciudad de México

Localidad	Inventario de Emisiones ¹			Mediciones ²			Discrepancia
	NOx	COV	Cociente	NOx	COV	Cociente	Factor
San Antonio La Isla	1.44	16.65	11.59	44.68	215.79	4.83	2.40
Tollocan	1031.51	5576.47	5.41	164.94	761.96	4.62	1.17
Villa Cuauhtémoc	2.37	52.57	22.19	116.02	278.42	2.40	9.25
Iztapalapa-Cd. De México	358.18	2910.01	8.12	0.13	1.11	8.83	0.92

1. La información del Inventario de Emisiones se muestra en Ton/mol por año
2. Los datos de mediciones de NOx están en ppb y para COV están en ppbC

Debido a que tanto en el Valle de Toluca como en Iztapalapa en la Ciudad de México hay fuerte correlación entre las concentraciones de los compuestos orgánicos volátiles para ambas localidades, entonces fue apropiado realizar análisis multivariado factorial por componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), con el fin de identificar la asociación entre variables por correlación de las especies químicas en la conformación de una nueva variable que agrupara a éstas. Se obtuvieron cuatro factores para el Valle de Toluca y tres factores para Iztapalapa en la Ciudad de México. Dichos factores son considerados como fuentes potenciales de emisión. En ambas localidades se utilizaron solo aquellas variables con porcentajes elevados de concentraciones mayores al límite de cuantificación (Anexo 1) y con comunalidades, es decir variabilidad compartida en el modelo en casos excepcionales del 70%, estando la mayoría de COV por arriba de 90%.

En ambas localidades, Valle de Toluca e Iztapalpa en la Ciudad de México, la prueba estadística de esfericidad de Bartlett fue significativa ($p < 0.001$) aceptando el uso de PCA y la medida de KMO Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo, resuelto para los dos análisis de 0.81, cuya métrica va de 0 a 1, determinando esto la aceptación de la aplicación de PCA para ambos casos.

El número de factores a considerarse, se determinó basado en la cantidad de factores que tuvieron eigenvalores o valores propios iguales o mayores a 1, condición de cumplimiento del modelo en la selección del número de componentes.

El análisis de PCA de las muestras del Valle de Toluca, explica cerca del 94% de la varianza de los datos obtenidos en el conjunto de las muestras de los tres sitios de muestreo de los meses de febrero a marzo, de la siguiente manera: 41% del componente 1; 24% del componente 2; 16%; del componente 3 y 13% atribuido al componente 4 (Tabla 18). Dichos componentes por su composición representan a emisiones vehiculares; emisiones evaporativas; fugas de gas LP por su distribución y uso en hogares y en procesos industriales; y al uso de disolventes, respectivamente, cuyas correlaciones de las especies químicas de COV para cada componente se agruparon de forma similar en estudios de otras localidades tales como Shanghai, China (Geng et al., 2009); Kaohsiung, Taiwan (Chang et al., 2009) y en Honk Kong (Guo et al., 2007).

Los componentes principales por puntaje absoluto y regresión múltiple (APCS-MLR), fueron calculados a partir de los coeficientes de puntuación de cada especie química en cada factor y la contribución de cada factor por muestreo. El modelo fue resuelto para cada localidad, tomando la sumatoria de los COV como variable dependiente para obtener la regresión múltiple mediante el uso del paquete estadístico SPSS versión 24. La operación de matrices para calcular los puntajes absolutos de los componentes principales o factores, fue realizada en MS-Excel previamente a la aplicación de la regresión múltiple.

Tabla 18. Análisis de Componentes Principales de COV del Valle de Toluca

Compuesto	Factor			
	1	2	3	4
etano	0.9			
propano	0.7		0.5	
n-butano			0.9	
isobutano			0.9	
isopentano	0.9			
n-pentano	0.9			
ciclopentano	0.9			
2,3-dimetilbutano+2-metilpentano	0.7			0.5
3-metilpentano	0.7			0.5
n-hexano	0.7			0.6
ciclohexano				0.8
metilciclohexano	0.6			0.7
2,3-dimetilpentano+3-metilhexano+2-metilhexano	0.7			0.5
n-heptano	0.8			0.5
etileno	0.9			
propileno	0.9			
t-2-buteno	0.9			
c-2-buteno			0.9	
1-buteno	0.9			
acetileno	0.9			
benceno	0.5	0.8		
tolueno		0.7	0.5	
etilbenceno			0.7	
o-xileno		0.8		
1-etil-4-metil benceno		0.9		
1,3,5-trimetil benceno		0.9		
1,2,4-trimetilbenceno		0.9		
MTBE		0.8		
Eigenvalor	20.0	2.9	2.2	1.2
% de Varianza	41.4	24.1	15.7	12.7
% Varianza acumulada	41.4	65.5	81.2	93.9
Fuente potencial de emisión	Emisiones vehiculares	Emisiones evaporativas	Fugas de gas LP	Uso de disolventes

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

Convergencia de rotación en 5 iteraciones

Se muestran los factores con eigenvalor mayor a 1

Sólo se muestran los coeficientes a partir de 0.5. En negritas se señalan las máximas correlaciones.

El modelo para el Valle de Toluca tuvo una R^2 de 0.9343 de los registros modelados contra los observados y una desviación de 8.6%. Se observó que las emisiones vehiculares aportan el 40%, las evaporativas el 32%, las fugas de gas LP el 16% y la aplicación y uso de disolventes el 12%, del total de los compuestos orgánicos volátiles (Figura 9). Así mismo, en la Figura 10 se presentan las concentraciones generadas a partir del modelo PCA/APCS-MLR, confirmando que Tollocan es el sitio más crítico, cuyas emisiones evaporativas y vehiculares son las de mayor contribución, ambas suman 560 ppbC.

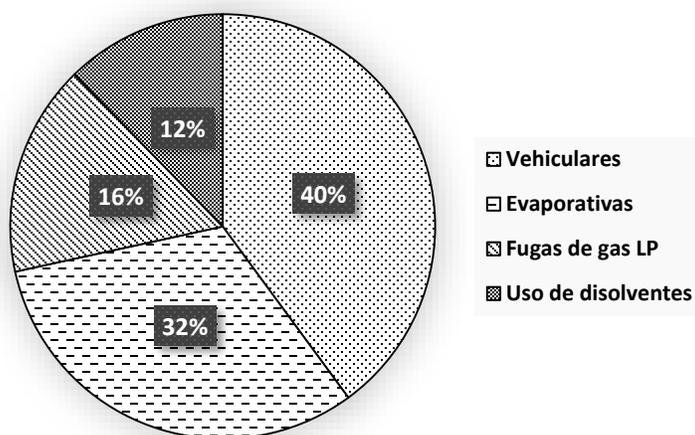


Figura 9. Aporte de compuestos orgánicos volátiles por las principales fuentes de emisión conforme al modelo APC/APCS-MLR para el Valle de Toluca

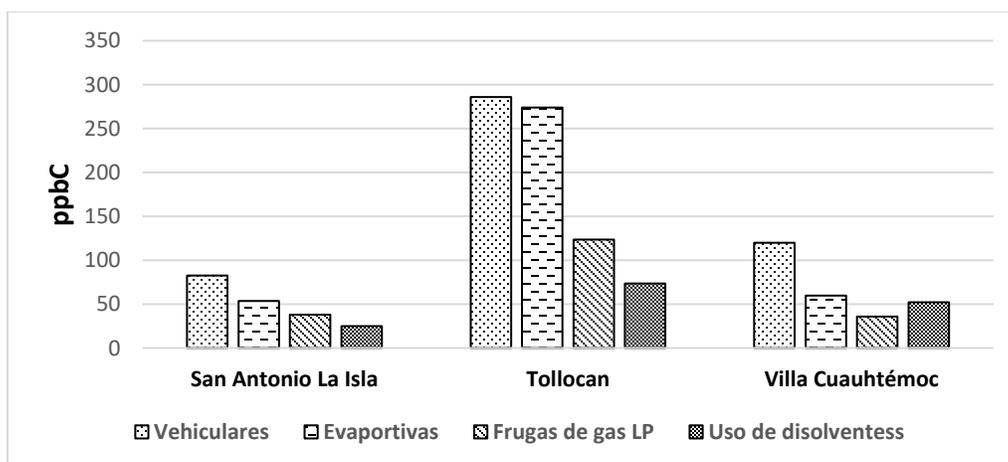


Figura 10. Contribuciones de COV por fuentes de emisión en los diferentes sitios de muestreo en el Valle de Toluca

Para Iztapalapa, es importante señalar que debido a la disponibilidad de más datos horarios, se amplió el número de muestra de 28 a 42 datos horarios, comprendidos entre las 6 y las 11 de la mañana para aplicar el modelo de forma más eficiente. En este sitio de muestreo el análisis de componentes principales explica cerca del 88% de la varianza de las muestras horarios de la mañana de febrero a marzo de 2016, correspondiendo al 43% del componente 1; 37% del componente 2; y 8% del componente 3 (Tabla 19).

Por la composición de las especies químicas corresponden a emisiones vehiculares más fugas de gas LP para el factor 1; uso y aplicación de disolventes más fugas de gas LP en el factor 2 y para el factor 3 la industria, tomando como referencia la agrupación de especies químicas en cada factor, de otros estudios (Guo et al., 2007; Chang et al., 2009 y Geng et al., 2009).

El análisis de PCA/APCS-MLR determinó que del total de COV el 65% se refiere al grupo de emisores del factor 1, el 22% al grupo de fuentes del factor 2 y el 13% a la industria. Este análisis tuvo una R^2 de 0.94 y una desviación de apenas 0.4% entre las concentraciones observadas y las modeladas.

Los factores 1 y 2, presentan gran complejidad de discernir la contribución de fuentes, por ello se aplicó una segunda regresión múltiple para cuantificar las aportaciones a estos factores, de las especies químicas sumadas de propano, n-butano e isobutano que son componentes del gas LP, emisiones que fueron sustraídas de dichos factores; de los cuales 371 ppbC se atribuyen a fugas de gas LP de origen domiciliario y del transporte público en el factor 1 y 138 ppbC corresponden a fugas de gas LP, en el factor 2 asociado posiblemente con servicios y comercios en donde se utilizan o procesan disolventes (Figura 11).

Por lo tanto las contribuciones de las emisiones de COV fueron 27% de la actividad vehicular, 8% del uso y aplicación de disolventes, 13% de la industria química-petroquímica y 52% por fugas del uso y distribución del gas LP (Figura 12).

Tabla 19. Análisis de Componentes Principales de COV de Iztapalapa en la Cd. de México

Compuesto	Factor		
	1	2	3
etano	0.7	0.6	
propano	0.7	0.7	
n-butano	0.7	0.7	
isobutano	0.7	0.7	
2,2-dimetilbutano		0.9	
ciclopentano	0.7	0.6	
isopentano	0.7	0.6	
n-pentano	0.8	0.6	
ciclohexano	0.5	0.8	
2,3-dimetilbutano_y_2- metilpentano	0.6	0.7	
3-metilpentano	0.6	0.8	
n-hexano	0.5	0.7	
metilciclohexano		0.9	
2,3-dimetilpentano+3- metilhexano+2- metilhexano	0.6	0.6	
n-heptano	0.6	0.7	
2,3,4-trimetilpentano	0.8	0.6	
2-metilheptano	0.8		
3-metilheptano	0.8	0.5	
n-octano	0.8		
isooctano	0.7	0.6	
n-nonano	0.7		
etileno	0.7	0.5	0.5
propileno	0.7		0.6
t-2-buteno	0.6	0.7	
c-2-buteno	0.6	0.7	
1-buteno			0.8
1-penteno	0.8		
1-hexeno			0.8
acetileno	0.7	0.6	
benceno	0.8	0.6	
etilbenceno	0.9		
m-xileno	0.7	0.6	
Eigenvalor	24.5	2.3	1.2
% de Varianza	42.5	37.3	7.8
% Varianza acumulada	42.5	79.8	87.6
Fuente potencial de emisión	Fugas de gas LP + Emisiones vehiculares	Fugas de gas LP + Uso de disolventes	Industrial

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

Convergencia de rotación en 5 iteraciones

Se muestran los factores con eigenvalor mayor a 1

Sólo se muestran los coeficientes a partir de 0.5.

En negritas se señalan las máximas correlaciones.

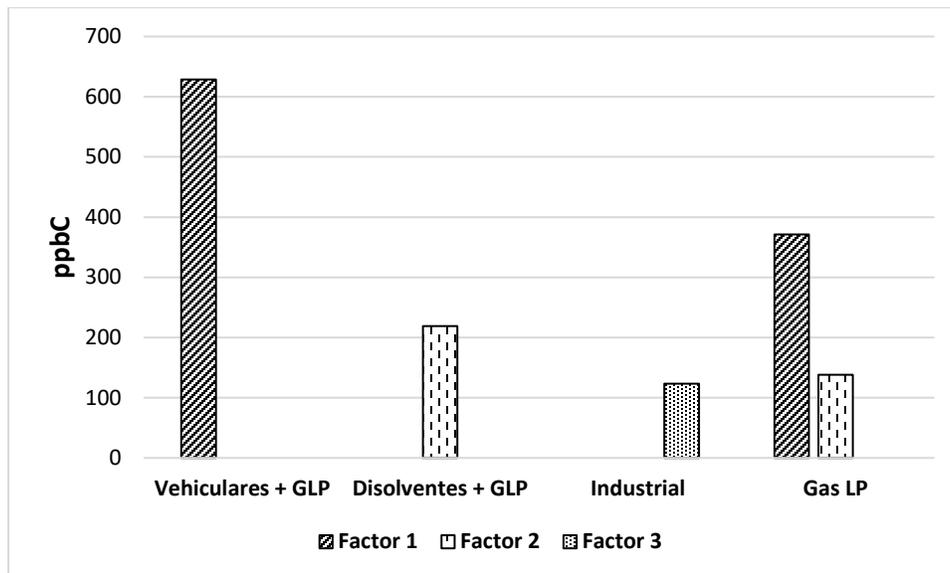


Figura 11. Contribución de los compuestos del gas LP en los factores 1 y 2 de las fuentes potenciales de emisión en el Oriente de la Ciudad de México

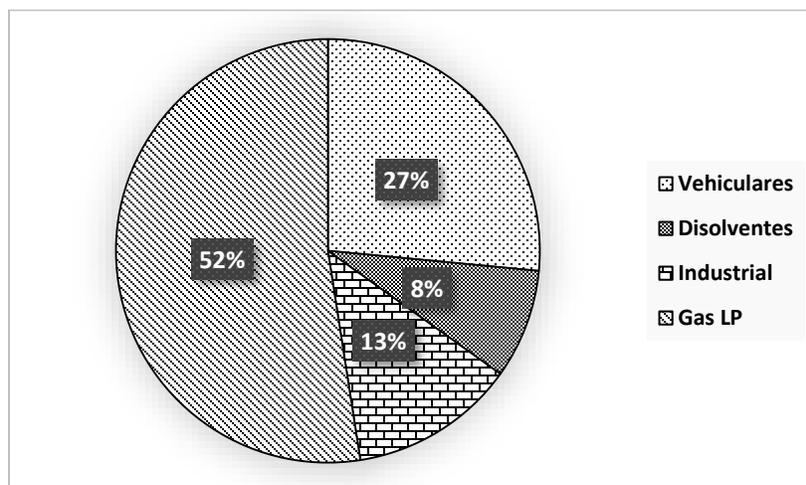


Figura 12. Aporte de compuestos orgánicos volátiles por las principales fuentes de emisión conforme al modelo PCA/APCS-MLR en Iztapalapa en la Ciudad de México

Compuestos contaminantes del aire fotoactivos peligrosos para la salud

La Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés) considera a 187 sustancias como contaminantes del aire peligrosas (HAP, por sus siglas en inglés) por propiciar en el ser humano el desarrollo de cáncer o bien por tener efectos tóxicos en la salud en diversos órganos blanco. En este listado se encuentran los siguientes compuestos orgánicos volátiles: 2,2,4-trimetilpentano, acetaldehído, benceno, etilbenceno, formolaldehído, isopropilbenceno, xilenos, n-hexano, estireno y tolueno.

Los compuestos evaluados en este estudio con efecto potencial tóxico y/o carcinogénico se presentan en la Tabla 20. Según el Sistema Integrado de Información de Riesgo de la USEPA (IRIS, por sus siglas en inglés, <https://www.epa.gov/iris>, consultado el 26 de febrero de 2018). Los xilenos, tolueno, hexano y estireno tienen efectos a nivel del sistema nervioso, el etilbenceno es tóxico durante el desarrollo y el benceno afecta al sistema cardiovascular con decremento en la cuenta de linfocitos y es carcinógeno con suficiente evidencia de sus efectos con clasificación 1, según la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) por su asociación directa con leucemia, cáncer de pulmón y riñón (IARC, 2012).

En la Tabla 20, se presentan las concentraciones de referencia crónicas (RfC, por sus siglas en inglés) por inhalación conforme al sistema USEPA-IRIS de evaluación de riesgo para la salud, así mismo se muestran los valores de concentración límites de protección de la salud del Gobierno de Ontario en Canadá (Ontario Ministry of the Environment, 2012) y el valor límite para benceno en el Reino Unido, la región de Europa y para la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2000; UK Environmental Protection, 2010; Ontario Ministry of the Environment, 2012; European Environmental Agency, 2016). Se observa que las concentraciones ambientales de los compuestos etilbenceno, xilenos, hexano, tolueno y estireno, presentan riesgo mínimo para exposiciones crónicas, sin embargo el benceno se sugiere sea observado por periodos largos de medición, con el fin de cuantificar con mayor detalle la exposición crónica de la población.

Aunque no es estrictamente comparable el límite de exposición para benceno en este estudio, debido a que éste es para un periodo anual (Europa) y en el caso de Ontario, Canadá también lo es para 24 horas, las mediciones realizadas fueron integradas de tres horas (7-10 am) para el Valle de Toluca y horaria (7-10 am) por

la mañana para Iztapalapa en la Ciudad de México. Es notorio que benceno presenta niveles de concentración cercanos al límite de exposición de la población en los sitios de ambas localidades, siendo importante puntualizar que en la zona urbana de Toluca en Tollocan, se presenta riesgo de exposición de tres veces superior al límite establecido por la Organización Mundial de la Salud y por la Agencia Ambiental Europea (Tabla 20).

Tabla 20. Comparación de concentraciones de COV tóxicos en los sitios San Antonio La Isla, Tollocan, Villa Cuauhtémoc e Iztapalapa con relación a los límites de exposición de protección de la salud de la población

Compuesto	Efecto en la salud	RfC ^a (µg/m ³)	Valor Límite Europa ^b (µg/m ³)	Valor límite Ontario ^b (µg/m ³)	San Antonio (µg/m ³)	Tollocan (µg/m ³)	V. Cuauhtémoc (µg/m ³)	Iztapalapa (µg/m ³)
Benceno	Sistema cardiovascular. Decremento en la cuenta de linfocitos. Cancerígeno 1	30	5	0.45 2.3 ^c	5	16	6	6
Etilbenceno	En el desarrollo. Toxicidad	1000		1000	6	13	5	25
Xilenos	Sistema nervioso. Coordinación motriz deteriorada	100		730	2	8	3	4
Hexano	Sistema nervioso. Neuropatía periférica	700		2500	2	7	3	12
Tolueno	Sistema nervioso. Efectos neurológicos	5000		2000	13	63	17	58
Estireno	Sistema nervioso central	1000		400	6	3	2	ND

a.- Concentración de referencia por exposición crónica inhalatoria

b.- Concentración anual de protección de la salud

c.- Concentración de protección de la salud en 24 horas de exposición

ND.- No determinado

Capítulo 5 CONCLUSIONES

El Valle de Toluca y el Valle de la Ciudad de México, se encuentran físicamente contiguos, separados por una barrera geográfica, cada uno con patrones específicos de circulación de las masas de aire a nivel del suelo, pero que comparten flujos de corrientes de aire a escala sinóptica. Existe un fuerte intercambio comercial entre ambas localidades y movimiento de población por cuestiones laborales. El tipo de industrias y comercio y la calidad y composición de sus combustibles no son los mismos entre ambas regiones, que se observan distintos en la concentración de las especies químicas de los compuestos orgánicos volátiles presentes en las muestras obtenidas en este estudio.

En este trabajo, se presentan resultados de la época de seca fría hacia la transición a seca caliente, por ello sólo son representativos a este periodo del año y a una área delimitada.

se observó que en Iztapalapa es mayor la concentración de compuestos orgánicos volátiles totales en un 30% con respecto al sitio más crítico del Valle de Toluca denominado Tollocan, que comparados con otras regiones del mundo, se demuestra que hay un problema crítico de los niveles de concentración de los compuestos orgánicos volátiles en ambas localidades.

En cuanto a su composición por grupo es similar en la contribución de olefinas en el aire ambiente, pero difiere en el orden de concentraciones de compuestos aromáticos y de aquellos alcanos derivados del gas licuado presurizado (GLP). En la Ciudad de México pese a que propano y butano son poco reactivos, estos son muy abundantes y en las proximidades del centro de Toluca los compuestos aromáticos son equivalentes o superiores a los determinados en Iztapalapa. Esto conlleva a sugerir políticas de reducción y control distintas en cada localidad.

En el Valle de Toluca los hidrocarburos saturados e insaturados proceden de emisiones vehiculares y una fracción de compuestos aromáticos también proviene de esta fuente pero además también se originan de las emisiones evaporativas de combustibles, de procesos industriales y de actividades comerciales. Los compuestos aromáticos son los máximos contribuyentes de la formación de ozono.

La Ciudad de México en Iztapalapa, registró la contribución de emisiones vehiculares por los alcanos y olefinas, emisiones evaporativas y por la distribución, uso y fugas del gas LP como los de mayor aporte en la formación de ozono. Así mismo existe contribución de relativa importancia de la industria, servicios y comercio.

La aplicación de la modelación de receptores por componentes principales por puntaje absoluto y regresión múltiple es una técnica muy valiosa que permitió en este trabajo distinguir las contribuciones de las fuentes de emisión de cada localidad. La mayor complejidad se hace patente en la Ciudad de México. Es pertinente enfocarse además de las emisiones vehiculares a otros emisores de gran importancia, tales como a servicios que generan emisiones evaporativas con agentes muy tóxicos, a ciertos sectores industriales que procesan COV y mayor atención para corregir fugas de gas LP.

Se recomienda ampliamente que se realicen más estudios en otras épocas del año y con una cobertura mayor incluyendo la zona industrial de Lerma y la región de San Mateo, con el fin de determinar variaciones estacionales y contribuciones de otras fuentes de área e industriales que posiblemente no fueron detectadas en este estudio. Así mismo se sugiere incluir el análisis de compuestos orgánicos volátiles halogenados, que permiten confirmar la presencia de otras fuentes de emisión.

Referencias

- Arriaga-Colina J. L., West J. J., Sosa G., Escalona S. S., Ordúñez R. M., Cervantes A. D. M. (2004). Measurements of VOCs in Mexico City (1992-2001) and evaluation of VOCs and CO in the emissions inventory. *Atmos. Environ.* 38: 2523-2533.
- Atkinson R. (1997). Gas-phase tropospheric chemistry of volatile organic compounds 1. Alkanes and alkenes. *J. Phys. Chem.* 26: 215–290.
- Atkinson R. y Arey J. (2003). Atmospheric degradation of volatile organic compounds. *Chem. Rev.* 103: 4605-4638.
- Blake D.R. y Rowland F.S. (1995). Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico City air quality. *Science.* 269(5226): 953-956.
- Carter W.P.L. (1994). Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 44: 881-99.
- Carter W.P.L. (2010). Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications. *Calif. Air Resour. Board* 1: 1-23.
- Celebi U.B. y Vardar N. (2008). Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards. *Atmos. Environ.* 42(22): 5685-5695.
- Chang C.C., Wang J.L., Lung S.C.C, Liu S.C., Shiu C.J. (2009). Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis. *Atmos. Environ.* 43: 1771–1778.
- Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME). (2017). Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis. Proaire de la Megalópolis 2017-2030. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México, 2017.
- Duan J., Tan J., Yang L., Wu S., Hao J. (2008). Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing. *Atmos. Res.* 88: 25 –35.
- Elbir T., Cetin B., Çetin E., Bayram A., Odabasi M. (2007). Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and their sources in the air of İzmir, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 133: 149-160.

European Environmental Agency (2016). Air Quality in Europe – 2016 report. 88pp.

Finlayson-Pitts B.J. y Pitts J.N. (1997). Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. *Science*. 276: 1045-1051.

Fujita E. M., Croes B. E., Bennett C. L., Lawson D. R., Lurmann F. W., Main H.H. (1992). Comparison of Emission Inventory and Ambient Concentration Ratios of CO, NMOG, and NOx in California's South Coast Air Basin. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 42: 264-276.

Garzón J. P., Huertas J. I., Magaña M., Huertas M.E., Cárdenas B., Watanabe T., Maeda T., Wakamatsu S., Blanco S. (2015). Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City. *Atmos. Environ.* 119: 415-429.

Geng F., Cai C., Tie X., Yu Q., An J., Peng L., Zhou G., Xu J. (2009). *J. Atmos. Chem.* 62: 229–247.

Guo H. y Murray F. (2000). Characterization of total volatile organic compound emissions from paints. *Clean Prod. Process.* 2(1): 28-36.

Guo H., Lee S.C., Loure P.K.K., Ho K.F. (2004). Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong. *Chemosphere*. 57: 1363-1372.

Guo H., Wang T. y Louie P.K.K. (2004). Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model. *Environ. Pollut.* 129: 489-496.

Guo H., So K.L., Simpson I.J., Barletta B., Meinardi S., Blake D.R. (2007). C1-C8 Volatile Organic Compounds in the Atmosphere of Hong Kong: Overview of Atmospheric Processing and Source Apportionment. *Atmos. Environ.* 41: 1456–1472.

Hopke P.K. (1985). *Receptor Modeling in Environmental Chemistry*. Wiley, New York.

Hoque R.R., Khillare P.S., Agarwal T., Shridhar V., Balachandran S. (2008). Spatial and temporal variation of BTEX in the urban atmosphere of Delhi, India. *Sci. Total Environ.* 392: 30-40.

Hsieh L.T., Wang Y.F., Yang H.H., Mi H.H. (2011). Measurements and correlations of MTBE and BTEX in traffic tunnels. *Aerosol Air Qual. Res.* 11: 763-775.

IARC. (2012). Chemical agents and related occupations. A review of human carcinogens. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum. 100F: 249-294.

Institute for Governance & Sustainable Development. (2013). Primer on Short-lived Climate Pollutant. Washington, DC. <http://www.igsd.org/documents/PrimeronShort-LivedClimatePollutants23april2013EV.pdf>.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). Informe Nacional de Calidad del Aire 2015, México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta. Ciudad de México. Diciembre 2016.

Islas V.H.S., Arroyo J., Lelis M., Ruvalcaba J., 2011. Implementing sustainable urban travel policies in Mexico. In: Proceedings of the International Transport Forum, 14, pp. 1-45.

Jaimes-Palomera M., Retama A., Elias-Castro G., Neria-Hernández A., Rivera-Hernández O., Velasco E. (2016). Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Mexico City: Results of the 2012 ozone-season campaign. *Atmos. Environ.* 132: 258-275.

Jorquera H. y Rappengluck B. (2004). Receptor modeling of ambient VOC at Santiago, Chile. *Atmos. Environ.* 38(25): 4243-4263.

Li B., Ho S.S.H., Xue Y., Huang Y., Wang L., Cheng Y., Lee S. (2017). Characterizations of volatile organic compounds (VOCs) from vehicular emissions at roadside environment: The first comprehensive study in Northwestern China. *Atmos. Environ.* 161(Supplement C): 1-12.

Lindfors V. y Laurila T. (2000). Biogenic volatile organic compound (VOC) emissions from forests in Finland. *Boreal Environ. Res.* 5 (2): 95-113.

Liu P.W.G., Yao Y.C., Tsai J.H., Hsu Y.C., Chang L.P., Chang K.H. (2008). Source impacts by volatile organic compounds in an industrial city of southern Taiwan. *Sci. Total Environ.* 398: 154–163.

Liu J., Mu Y., Zhang Y., Zhang Z., Wang X., Liu Y., Sun Z. (2009). Atmospheric levels of the BTEX compounds during the 2008 Olympic Games in the urban area of Beijing. *Sci. Total Environ.* 408: 109-116.

Menchaca-Torre H. L., Mercado-Hernández R., y Mendoza-Domínguez A. (2015). Diurnal and seasonal variation of volatile organic compounds in the atmosphere of Monterrey, Mexico. *Atmos. Pollut. Res.* 6(6): 1073-1081.

Molina L.T. y Molina M.J. (Eds.), (2002). *Air Quality in the Mexico Megacity: an Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers.

Molina L.T., Kolb C.E., de Foy B., Lamb B.K., Brune W.H., Jimenez J.L., Ramos-Villegas R., Sarmiento J., Paramo-Figueroa V.H., Cardenas B., Gutierrez-Avedoy V., Molina M.J. (2007). Air quality in North America's most populous city - overview of the MCMA-2003 campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 7(10): 2447-2473.

Molina L.T., de Foy B., Vasquez-Martínez O., Páramo V.H. (2009). Air quality, weather and climate in Mexico City. *WMO Bull. Weather Clim. Water* 58(1): 48-53.

Molina L.T., Madronich S., Gaffney J.S., Apel E., de Foy B., Fast J., Ferrare R., Herndon S., Jimenez J.L., Lamb B., Osornio-Vargas A.R., Russell P., Schauer J.J., Stevens P.S., Volkamer R., Zavala M., (2010). An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 10(18): 8697-8760.

Monks P.S., Archibald A.T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K.S., Mills G.E., Stevenson D.S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidemesser E., Sommariva R., Wild O., Williams M.L. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 15: 8889–8973.

Na K., Kim Y.P., Moon K.C., Moon I., Fung K. (2001). Concentrations of volatile organic compounds in an industrial area of Korea. *Atmos. Environ.* 35(15): 2747-2756.

Navazo M., Durana N., Alonso L., Gómez M. C., García J. A., Ilardia J. L., Iza J. (2008). High temporal resolution measurements of ozone precursors in a rural background station. A two-year study. *Environ. Monit. Assess.* 136(1): 53-68.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O₃). Valor normado para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. *Diario Oficial de la Federación*, 23 de diciembre de 1994.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) de la calidad

del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire. Diario Oficial de la Federación, 30 de octubre de 2002.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Diario Oficial de la Federación, 19 de agosto de 2014.

Ogawa H. y Li T. (2011). Volatile organic compounds in exhaust gas from diesel engines under various operating conditions. *Int. J. Engine Res.* 12(1): 30-40.

Ontario Ministry of the Environment. (2012). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. Standards Development Branch. Canada. 15pp.

Parrish D.D., Ryerson T.B., Mellqvist J., Johansson J., Fried A., Richter D., Walega J.G., Washenfelder R.A., de Gouw J.A., Peischl J., Aikin K.C., McKeen S.A., Frost G.J., Fehsenfeld F.C., Herndon S.C. (2012). Primary and secondary sources of formaldehyde in urban atmospheres: Houston Texas region. *Atmos. Chem. Phys.* 12(7): 3273-3288.

Ruiz M.E., Arriaga J.L., Garcia I. (1996). Determinación de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Ciudad de México mediante el uso de sistemas ópticos y métodos convencionales. *Atmósfera. Univ. Nac. Auton. Mex. (UNAM)* 9 (2): 119-135.

Saito S., Nagao I. y Kanzawa H. (2009). Characteristics of ambient C₂-C₁₁ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan. *Atmos. Environ.* 43(29): 4384-4395.

Sauvage S., Plaisance H., Locoge N., Wroblewski A., Coddeville P., Galloo J. C. (2009). Long term measurement and source apportionment of non-methane hydrocarbons in three French rural areas. *Atmos. Environ.* 43(15): 2430-2441.

Schmitz T., Hassel D. y Weber F.J., (2000). Determination of VOC-components in the exhaust of gasoline and diesel passenger cars. *Atmos. Environ.* 34(27): 4639-4647.

Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca (Proaire 2012-2017). (2012). Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Estado de México. México. 105pp.

Seinfeld J.H. y Pandis S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*, Second Edition ed., John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, USA.

Sillman S. (1999). The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmos. Environ.* 33(12): 1821-1845.

Sinha V., Williams J., Diesch J.M., Drewnick F., Martinez M., Harder H., Regelin E., Kubistin D., Bozem H., Hosaynali-Beygi Z., Fischer H., Andres-Hernández M.D., Kartal D., Adame J.A., and Lelieveld J. (2012). *Atmos. Chem. Phys.* 12: 7269–7283.

Streit G.E. y Guzman F. (1996). Mexico City air quality: progress of an international collaborative project to define air quality management options. *Atmos. Environ.* 30(5): 723-733.

Tang J.H., Chan L.Y., Chan C.Y., Li Y.S., Chang C.C., Liu S.C., Li Y.D. (2007). Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China. *Atmos. Environ.* 41(38): 8620-8632.

Thornhill D.A., Williams A.E., Onasch T.B., Wood E., Herndon S.C., Kolb C.E., Knighton W.B., Zavala M., Molina L.T., Marr L.C. (2010). Application of positive matrix factorization to on-road measurements for source apportionment of diesel- and gasoline-powered vehicle emissions in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* 10(8): 3629-3644.

Thurston G.D. y Spengler, J.D. (1985). A qualitative assessment of source contribution to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston. *Atmos. Environ.* 18: 1347–1355.

UK Environmental Protection. (2010). The Air Quality Standards Regulations. Statutory Instruments. United Kingdom. No. 1001.

USEPA. (1999a). Compendium Method TO-14A. Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air Using Specially Prepared Canisters with Subsequent Analysis by Gas Chromatography. EPA/625/R-96/010b.

USEPA. (1999b). Compendium Method TO-15. Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected in Specially-prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). EPA/625/R-96/010b.

Van Langenhove H. (2002). Environmental chemistry: organic chemistry. Ghent University.

Velasco E., Lamb B., Westberg H., Allwine E., Sosa G., Arriaga-Colina J.L., Molina M. J. (2007). Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 and 2003 field campaigns. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 6(4): 7563-7621.

von Schneidmesser, E., Monks, P. S., y Plass-Duelmer, C. (2010). Global comparison of VOC and CO observations in urban areas. *Atmos. Environ.* 44(39): 5053-5064.

Watson J.G., Chow J.C. y Fujita E.M. (2001). Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance. *Atmos. Environ.* 35(9): 1567-1584.

Wöhrnschimmel H., Magaña M., Stahel W.A., Blanco S., Acuña S., Pérez J.M., González S., Gutiérrez V., Wakamatsu S., Cárdenas B. (2010). Measurements and receptor modeling of volatile organic compounds in Southeastern Mexico City, 2000-2007. *Atmos. Chem. Phys.* 10(18): 9027-9037.

World Health Organization. (2000). Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series No. 91. 288pp.

Yuan Z.B., Lau A.K.H., Shao M., Louie P.K.K., Liu S.C., Zhu T. (2009). Source analysis of volatile organic compounds by positive matrix factorization in urban and rural environments in Beijing. *J. Geophys. Res.* 114:1-14.

Zhang R.Y., Tie X.X., Bond D.W. (2003). Impacts of anthropogenic and natural NO_x sources over the US on tropospheric chemistry. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 100(4): 1505-1509.

Zheng J., Garzón J.P., Huertas M.E., Zhang R., Levy M., Ma Y., Huertas J.I., Jardón R.T., Ruiz L.G., Tan H., Molina L.T. (2013). Volatile organic compounds in Tijuana during the Cal-Mex 2010 campaign: measurements and source apportionment. *Atmos. Environ.* 70: 521-531.

Anexos

Anexo 1. Constantes utilizadas, técnicas de laboratorio, límites de cuantificación y diferencia porcentual relativa para cada compuesto orgánico volátil

Compuesto	Grupo	No. de Carbonos	Peso Molecular	Método de Análisis ^a	L.C. inferior (ppbV) ^b	Diferencia Relativa (%) ^c	Datos >= L.C.I. Valle Toluca (%)	Datos >= LCI Iztapalapa C. Mex. (%)	Coef. de reacción con OH (cm ³ molecula ⁻¹ s ⁻¹) ^d	Máxima Reactividad Incrementada MIR (g O ₂ /g COV) ^e
etano	2-6S	2	30.10	TO14A	0.43	7.8	83	100	2.70E-13	0.28
ciclopentano	2-6S	5	70.10	TO14A	0.20	4.6	69	100	5.02E-12	2.39
isopentano	2-6S	5	72.20	TO14A	0.57	1.2	66	100	3.70E-12	1.45
n-pentano	2-6S	5	72.20	TO14A	0.57	4.7	63	100	3.94E-12	1.31
ciclohexano	2-6S	6	84.16	TO15	0.41	7.0	31	96	7.49E-12	1.25
2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	2-6S	6	86.20	TO14A	0.78	4.6	51	93	5.80E-12	1.24
3-metilpentano	2-6S	6	86.20	TO14A	0.61	5.6	46	96	5.70E-12	1.80
n-hexano	2-6S	6	86.20	TO15	0.60	12.7	54	100	5.61E-12	1.24
metilciclopentano	2-6S	6	84.16	TO14A	0.39	6.4	ND	25	ND	ND
2,2-dimetilbutano	2-6S	6	86.17	TO14A	0.39	4.7	ND	54	ND	ND
2,4-dimetilpentano	2-6S	6	100.2	TO14A	0.78	4.7	ND	ND	ND	ND
propano	GLP	3	44.10	TO14A	0.82	2.6	71	100	1.15E-12	0.49
isobutano	GLP	4	58.10	TO14A	0.59	1.6	77	100	2.19E-12	1.23
n-butano	GLP	4	58.10	TO14A	0.60	2.1	80	100	2.54E-12	1.15
etileno	2-6N	2	28.10	TO14A	0.65	2.2	74	100	8.52E-12	9.00
propileno	2-6N	3	42.10	TO14A, TO15	0.21	1.7	83	100	2.63E-11	11.66
acetileno	2-6N	2	26.00	TO14A	0.88	1.7	74	100	9.10E-13	0.95
t-2-buteno	2-6N	4	56.10	TO14A	0.21	2.7	60	86	6.40E-11	15.16
1-buteno	2-6N	4	56.10	TO14A	0.21	1.1	74	100	3.14E-11	9.73
c-2-buteno	2-6N	4	56.10	TO14A	0.21	1.9	51	82	5.64E-11	14.24
1-penteno	2-6N	5	70.10	TO14A	0.19	9.4	37	100	3.14E-11	7.21
1-hexeno	2-6N	6	84.16	TO14A	0.20	5.1	40	86	3.70E-11	5.49
t-2-penteno	2-6N	5	70.13	TO14A	0.60	6.1	ND	14	ND	ND
c-2-penteno	2-6N	5	70.13	TO14A	0.21	5.0	ND	21	ND	ND
metilciclohexano	7-9S	7	98.20	TO14A	0.21	7.4	40	96	1.04E-11	1.70
2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilheptano	7-9S	7	100.20	TO14A	0.63	6.7	46	100	7.07E-12	1.34
n-heptano	7-9S	7	100.20	TO14A, TO15	0.21	7.0	43	100	7.15E-12	1.07
2,3,4-trimetilpentano	7-9S	8	114.20	TO14A	0.41	6.5	20	93	7.00E-12	1.03
3-metilheptano	7-9S	8	114.20	TO14A	0.22	7.2	34	100	ND	1.24
2-metilheptano	7-9S	8	114.20	TO14A	0.21	3.9	17	61	8.20E-12	1.07
n-octano	7-9S	8	114.20	TO14A	0.21	8.0	29	96	8.70E-12	0.90
n-nonano	7-9S	9	128.26	TO14A	0.21	ND	20	86	1.00E-11	0.78
isooctano	7-9S	8	114.22	TO14A	0.82	3.5	ND	68	ND	ND
benceno	Aromaticos	6	78.10	TO14A, TO15	0.88	6.2	83	100	1.23E-12	0.72
tolueno	Aromaticos	7	92.10	TO14A, TO15	1.04	7.1	89	100	5.96E-12	4.00
etilbenceno	Aromaticos	8	106.17	TO15	0.40	11.8	71	100	7.10E-12	3.04
p-xileno	Aromaticos	8	106.17	TO15	0.61	11.2	31	32	1.43E-11	5.84
m-xileno	Aromaticos	8	106.17	TO15	0.61	8.9	46	93	2.31E-11	9.75
o-xileno	Aromaticos	8	106.17	TO15	0.44	13.5	83	ND	1.37E-11	7.64
estireno	Aromaticos	8	104.15	TO15	0.88	ND	20	ND	5.80E-11	1.73
1-etil-4-metilbenceno	Aromaticos	9		TO15	0.42	ND	46	ND	ND	ND
1,3,5-trimetilbenceno	Aromaticos	9	120.21	TO15	0.43	ND	40	ND	5.75E-11	11.76
1,2,4-trimetilbenceno	Aromaticos	9	120.21	TO15	0.43	ND	80	ND	3.25E-11	8.87
MTBE	Oxigenado	5	88.15	TO15	0.44	ND	89	ND	2.90E-12	0.73
2-butanona	Oxigenado	4	72.11	TO15	2.20	ND	74	ND	1.22E-12	1.48
isopreno	Biogénico	5	68.10	TO14A	0.20	10.3	23	50	1.01E-10	10.61

a.- TO14A (USEPA, 1999a), TO15 (USEPA, 1999), en el caso del muestreo en línea de la Ciudad de México los compuestos fueron analizados por TO14A; b.- Límite de cuantificación inferior; c.- USEPA, 1999a y 1999b; d.- Atkinson, 1997 y Atkinson y Arey, 2003; e.- Carter 1994, 2010. ND.- No detectado

Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca

Sitio	Fecha	Periodo	etano	etileno	propano	propileno	isobutano	n-butano	acetileno	t-2-buteno	1-buteno
Tollocan	18-feb	7-10	6.89	9.91	30.62	3.25	6.13	12.17	7.72	0.72	0.89
V. Cuauhtémoc	18-feb	7-10	2.11	6.76	8.29	2.23	2.71	5.35	5.42	0.38	0.58
Tollocan	20-feb	7-10	1.63	9.04	0.41	3.26	1.88	3.97	6.06	0.45	0.76
V. Cuauhtémoc	20-feb	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
Tollocan	21-feb	7-10	16.20	20.22	50.53	6.45	9.52	18.93	17.83	1.01	1.50
V. Cuauhtémoc	21-feb	7-10	5.31	7.58	19.49	2.78	3.94	7.98	5.15	0.44	0.68
San Antonio	21-feb	7-10	3.90	6.15	19.06	1.86	3.54	7.30	5.70	0.29	0.49
Tollocan	22-feb	7-10	11.09	14.17	39.39	4.87	7.95	15.84	10.71	0.71	1.20
V. Cuauhtémoc	22-feb	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
San Antonio	22-feb	7-10	4.49	6.40	17.17	2.21	3.26	7.19	4.04	0.26	0.46
Tollocan	23-feb	7-10	5.81	13.86	39.10	4.94	7.61	15.03	9.95	0.77	1.25
V. Cuauhtémoc	23-feb	7-10	4.58	7.70	7.64	2.46	2.47	5.12	6.11	0.38	0.71
San Antonio	23-feb	7-10	5.88	0.33	0.41	1.07	0.70	2.90	0.44	0.11	0.28
Tollocan	24-feb	7-10	5.99	12.57	26.73	4.47	5.30	11.24	9.09	0.61	1.00
V. Cuauhtémoc	24-feb	7-10	7.54	9.49	17.59	3.08	3.92	7.77	7.65	0.55	0.81
San Antonio	24-feb	7-10	4.92	3.20	5.29	1.26	1.76	4.53	1.96	0.11	0.36
San Antonio	25-feb	7-10	3.42	4.35	21.76	1.88	4.11	11.55	2.54	0.24	0.42
San Antonio	27-feb	7-10	1.98	0.33	0.41	0.51	0.30	1.20	0.44	0.11	0.11
San Antonio	28-feb	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
Tollocan	08-mar	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
Tollocan	09-mar	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
Tollocan	10-mar	7-10	8.12	12.43	66.87	4.25	36.18	82.16	10.64	0.69	0.94
V. Cuauhtémoc	10-mar	7-10	3.49	4.01	10.39	1.64	3.07	6.34	3.21	0.11	0.28
Tollocan	11-mar	7-10	9.43	16.65	62.89	6.31	9.96	22.20	14.94	0.78	1.15
V. Cuauhtémoc	11-mar	7-10	3.54	4.65	39.18	1.95	8.49	18.85	3.91	0.26	0.31
Tollocan	13-mar	7-10	10.58	19.52	69.64	7.31	18.20	40.71	14.06	0.80	1.34
V. Cuauhtémoc	13-mar	7-10	0.64	0.33	0.41	0.33	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
San Antonio	13-mar	7-10	2.00	4.39	13.00	1.85	2.76	6.25	4.01	0.11	0.35
Tollocan	14-mar	7-10	7.15	15.37	48.33	5.79	7.53	17.04	11.87	0.65	0.98
V. Cuauhtémoc	14-mar	7-10	0.22	0.33	0.41	0.11	0.30	0.30	0.44	0.11	0.11
San Antonio	14-mar	7-10	2.99	3.80	13.21	1.58	2.77	6.30	3.08	0.11	0.32
Tollocan	15-mar	7-10	1.19	3.69	6.02	1.72	2.21	5.64	3.27	0.38	1.04
V. Cuauhtémoc	15-mar	7-10	5.98	6.34	41.62	2.35	9.80	24.20	5.43	0.41	0.53
San Antonio	15-mar	7-10	0.99	2.05	4.31	0.97	2.33	5.44	1.87	0.11	0.11
San Antonio	16-mar	7-10	3.02	5.56	14.62	2.02	3.08	7.17	5.14	0.23	0.36

Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca (Continuación)

Sitio	Fecha	ciclopentano	c-2-buteno	isopentano	n-pentano	1-penteno	ciclohexano	2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	3-metilpentano	n-hexano	isopreno
Tollocan	18-feb	1.10	0.51	5.31	3.19	0.10	0.56	2.49	1.19	1.32	0.10
V. Cuauhtémoc	18-feb	0.36	0.27	2.63	1.76	0.20	0.21	0.39	0.67	0.62	0.10
Tollocan	20-feb	0.86	0.41	2.61	1.89	0.10	0.21	2.01	0.63	1.40	0.10
V. Cuauhtémoc	20-feb	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	21-feb	2.59	0.82	8.28	5.93	0.27	0.21	4.49	1.66	2.38	0.10
V. Cuauhtémoc	21-feb	0.65	0.38	3.27	2.04	0.31	0.21	0.97	0.63	0.78	0.10
San Antonio	21-feb	0.51	0.23	1.92	1.38	0.10	0.21	0.39	0.31	0.61	0.10
Tollocan	22-feb	1.71	0.57	6.51	4.47	0.10	0.21	2.78	1.58	1.89	0.10
V. Cuauhtémoc	22-feb	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
San Antonio	22-feb	0.45	0.11	1.70	1.36	0.35	0.21	0.87	0.31	0.85	0.21
Tollocan	23-feb	1.49	0.60	6.14	4.15	0.10	0.62	3.22	1.53	1.87	0.21
V. Cuauhtémoc	23-feb	0.69	0.24	2.59	2.08	0.10	0.21	1.23	0.70	1.01	0.10
San Antonio	23-feb	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.21
Tollocan	24-feb	1.40	0.47	4.52	3.07	0.26	0.46	2.52	1.07	1.52	0.10
V. Cuauhtémoc	24-feb	1.09	0.38	3.36	2.51	0.10	0.43	2.25	0.82	1.38	0.10
San Antonio	24-feb	0.38	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
San Antonio	25-feb	0.47	0.23	0.92	0.99	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
San Antonio	27-feb	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.39
San Antonio	28-feb	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	08-mar	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	09-mar	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	10-mar	1.14	11.93	3.24	0.29	0.22	0.62	4.39	1.24	1.96	0.10
V. Cuauhtémoc	10-mar	0.44	0.11	1.04	0.77	1.25	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	11-mar	1.88	0.61	8.80	4.95	0.47	1.26	6.68	1.88	4.00	0.10
V. Cuauhtémoc	11-mar	0.37	0.11	2.29	1.26	0.10	0.65	2.29	0.97	1.98	0.27
Tollocan	13-mar	2.69	0.65	7.85	4.73	0.43	1.17	6.06	2.35	3.84	0.47
V. Cuauhtémoc	13-mar	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.59
San Antonio	13-mar	0.33	0.11	1.41	1.05	0.23	0.21	1.04	0.31	0.30	0.10
Tollocan	14-mar	1.62	0.46	6.70	3.70	0.47	1.04	4.35	2.56	3.82	0.34
V. Cuauhtémoc	14-mar	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
San Antonio	14-mar	0.38	0.11	1.50	1.04	0.23	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
Tollocan	15-mar	0.10	3.34	0.29	0.29	0.10	0.21	0.39	0.31	0.30	0.10
V. Cuauhtémoc	15-mar	0.71	0.33	5.46	2.41	2.48	0.64	3.05	1.28	2.38	0.10
San Antonio	15-mar	0.10	0.11	0.29	0.29	0.10	0.49	0.39	0.31	0.30	0.10
San Antonio	16-mar	0.42	0.11	1.97	1.63	0.10	0.21	1.09	0.31	0.79	0.10

Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca (Continuación)

Sitio	Fecha	1-hexeno	metilciclohexano	2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano	n-heptano	benceno	2,3,4-trimetilpentano	3-metilheptano	2-metilheptano	n-octano
Tollocan	18-feb	0.47	0.26	0.95	0.31	2.38	0.21	0.29	0.11	0.23
V. Cuauhtémoc	18-feb	0.10	0.11	0.66	0.11	2.01	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	20-feb	0.10	0.24	0.71	0.29	2.40	0.21	0.28	0.11	0.11
V. Cuauhtémoc	20-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	21-feb	0.58	0.53	2.11	0.83	7.86	1.19	0.41	0.22	0.33
V. Cuauhtémoc	21-feb	0.21	0.11	0.32	0.28	3.32	0.21	0.11	0.11	0.23
San Antonio	21-feb	0.24	0.11	0.32	0.11	2.44	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	22-feb	0.29	0.25	1.42	0.56	5.54	0.21	0.39	0.11	0.32
V. Cuauhtémoc	22-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	22-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	2.31	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	23-feb	0.34	0.34	1.79	0.71	5.25	0.21	0.33	0.11	0.27
V. Cuauhtémoc	23-feb	0.10	0.11	0.71	0.30	3.04	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	23-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	1.32	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	24-feb	0.51	0.39	1.09	0.42	4.49	0.21	0.34	0.11	0.11
V. Cuauhtémoc	24-feb	0.27	0.39	0.84	0.35	3.46	0.81	0.11	0.24	0.24
San Antonio	24-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	1.47	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	25-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	2.09	0.21	0.11	0.45	0.11
San Antonio	27-feb	0.20	0.11	1.08	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	28-feb	0.10	0.11	0.32	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	08-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	7.22	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	09-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	3.78	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	10-mar	0.35	0.21	1.11	0.33	6.19	0.46	0.37	0.11	0.26
V. Cuauhtémoc	10-mar	0.10	0.25	0.32	0.11	1.93	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	11-mar	0.49	0.80	2.40	0.93	6.20	0.89	0.74	0.29	0.45
V. Cuauhtémoc	11-mar	0.10	0.31	0.70	0.29	1.88	0.21	0.11	0.23	0.11
Tollocan	13-mar	0.77	1.04	2.24	0.88	6.72	1.01	0.87	0.35	0.56
V. Cuauhtémoc	13-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	13-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	1.72	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	14-mar	0.49	0.73	2.01	0.81	5.09	0.60	0.55	0.11	0.42
V. Cuauhtémoc	14-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	0.44	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	14-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	1.50	0.21	0.11	0.11	0.11
Tollocan	15-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	1.83	0.21	0.32	0.11	0.11
V. Cuauhtémoc	15-mar	0.10	0.29	0.83	0.49	2.42	0.43	0.41	0.11	0.11
San Antonio	15-mar	0.22	0.11	0.32	0.11	1.20	0.21	0.11	0.11	0.11
San Antonio	16-mar	0.10	0.11	0.32	0.11	2.14	0.21	0.11	0.11	0.11

Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca (Continuación)

Sitio	Fecha	tolueno	n-nonano	etilbenceno	p-xileno	m-xileno	o-xileno	MTBE	2-butanona	estireno	1-etil-4-metil benceno	1,3,5-trimetil benceno	1,2,4-trimetilbenceno
Tollocan	18-feb	5.63	0.21	1.32	0.31	0.31	1.40	3.62	23.70	0.44	0.21	0.22	0.99
V. Cuauhtémoc	18-feb	4.29	0.11	0.90	0.93	1.78	1.03	2.54	14.16	0.44	0.21	0.22	0.68
Tollocan	20-feb	4.92	0.23	4.78	1.06	0.31	1.18	2.82	6.40	0.44	0.56	0.45	1.32
V. Cuauhtémoc	20-feb	0.52	0.11	0.20	0.31	0.31	0.22	0.22	1.10	0.44	0.21	0.22	0.22
Tollocan	21-feb	26.97	0.11	0.20	0.31	0.31	3.82	8.40	30.41	1.36	1.25	1.14	3.38
V. Cuauhtémoc	21-feb	5.98	0.11	0.79	0.74	1.36	1.14	2.70	3.08	0.44	0.21	0.22	0.75
San Antonio	21-feb	4.64	0.11	0.49	0.31	1.10	0.92	2.18	4.13	0.44	0.21	0.22	0.92
Tollocan	22-feb	15.60	0.11	1.31	1.63	3.23	2.50	6.00	7.91	0.44	1.69	0.91	3.06
V. Cuauhtémoc	22-feb	0.52	0.11	0.20	0.31	0.31	0.22	0.22	1.10	0.44	0.21	0.22	0.22
San Antonio	22-feb	4.49	0.11	3.34	0.31	0.31	0.74	2.14	10.49	0.44	0.21	0.22	0.86
Tollocan	23-feb	11.63	0.21	1.41	1.49	2.92	2.37	5.88	6.53	0.44	0.84	0.73	2.28
V. Cuauhtémoc	23-feb	7.03	0.11	0.61	0.71	2.01	1.43	3.65	13.54	0.44	0.61	0.52	1.38
San Antonio	23-feb	4.17	0.11	0.20	0.31	0.31	0.56	1.11	6.92	1.30	0.21	0.22	0.60
Tollocan	24-feb	10.25	0.23	1.33	1.24	2.85	1.97	4.82	6.46	0.44	0.68	0.64	1.97
V. Cuauhtémoc	24-feb	9.54	0.11	0.89	0.31	1.17	1.64	3.85	4.98	0.44	0.61	0.22	1.59
San Antonio	24-feb	4.57	0.11	0.42	0.31	0.65	0.59	1.12	4.30	1.16	0.21	0.22	0.54
San Antonio	25-feb	4.50	0.11	0.20	0.31	0.78	0.55	1.45	5.23	0.44	0.21	0.22	0.67
San Antonio	27-feb	2.43	0.11	0.47	0.31	0.31	0.46	0.49	5.32	8.73	0.21	0.22	0.22
San Antonio	28-feb	0.52	0.11	0.20	0.31	0.31	0.22	0.22	1.10	0.44	0.21	0.22	0.22
Tollocan	08-mar	17.66	0.11	0.20	0.31	0.31	4.54	10.51	8.65	1.54	2.09	1.84	4.45
Tollocan	09-mar	26.26	0.11	0.20	0.31	0.31	2.24	7.49	10.55	0.44	0.87	0.69	2.43
Tollocan	10-mar	35.53	0.11	9.25	1.63	0.87	4.77	9.76	11.94	0.44	0.98	0.88	2.81
V. Cuauhtémoc	10-mar	4.62	0.11	0.48	0.31	1.16	0.94	2.36	3.50	0.44	0.21	0.22	1.02
Tollocan	11-mar	27.85	0.32	9.45	0.84	1.30	3.46	9.86	7.57	0.44	1.33	1.31	3.36
V. Cuauhtémoc	11-mar	6.70	0.11	3.35	0.31	0.31	1.19	3.16	6.68	0.44	0.21	0.22	1.13
Tollocan	13-mar	15.21	0.68	2.57	1.90	4.29	3.90	9.82	7.45	1.44	1.85	1.80	4.30
V. Cuauhtémoc	13-mar	1.70	0.11	0.20	0.31	0.31	0.22	0.66	4.92	0.44	0.21	0.22	0.22
San Antonio	13-mar	3.90	0.11	2.13	0.31	0.31	0.66	2.39	1.10	0.44	0.21	0.22	0.69
Tollocan	14-mar	12.12	0.29	1.85	1.55	4.82	2.55	7.38	11.61	0.44	1.10	1.11	2.61
V. Cuauhtémoc	14-mar	0.52	0.11	0.20	0.31	0.31	0.22	0.22	1.10	0.44	0.21	0.22	0.22
San Antonio	14-mar	2.37	0.11	3.37	0.31	0.31	0.55	1.48	1.10	0.44	0.21	0.22	0.49
Tollocan	15-mar	4.06	0.11	4.18	0.31	0.31	1.08	2.98	7.69	0.44	0.52	0.22	1.21
V. Cuauhtémoc	15-mar	7.35	0.11	3.66	0.31	0.71	1.13	5.78	1.10	1.50	0.48	0.46	1.09
San Antonio	15-mar	2.06	0.11	2.21	0.31	0.31	0.22	1.57	1.10	0.44	0.21	0.22	0.22
San Antonio	16-mar	3.92	0.11	2.62	0.31	0.31	1.09	1.57	1.10	0.44	1.03	0.58	1.31

Anexo 2. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de los sitios del Valle de Toluca (Continuación)

Sitio	Fecha	t-2-penteno	metilciclopentano	c-2-penteno	2,2-dimetilbutano	2,4-dimetilpentano	isooctano
Tollocan	18-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	18-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	20-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	20-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	21-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	21-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	21-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	22-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	22-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	22-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	23-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	23-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	23-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	24-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	24-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	24-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	25-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	27-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	28-feb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	08-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	09-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	10-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	10-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	11-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	11-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	13-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	13-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	13-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	14-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	14-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	14-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tollocan	15-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V. Cuauhtémoc	15-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	15-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Antonio	16-mar	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND.- No detectado

Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México

Sitio	Fecha	Periodo	etano	etileno	propano	propileno	isobutano	n-butano	acetileno	t-2-buteno	1-buteno
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	07:00	17.66	30.75	199.01	10.97	22.16	44.32	24.08	1.56	2.68
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	08:00	11.89	15.87	76.98	6.85	9.59	18.91	11.61	0.59	2.47
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	09:00	14.72	17.32	78.17	7.41	10.29	20.52	11.64	0.62	3.31
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	10:00	15.30	15.97	71.45	7.71	8.55	18.12	9.77	0.34	4.03
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	07:00	33.27	49.07	337.56	18.22	40.08	86.75	42.52	2.79	4.06
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	08:00	25.51	45.26	298.51	14.95	30.20	65.46	34.10	2.04	4.36
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	09:00	12.54	19.94	134.23	8.23	14.79	32.61	15.98	0.62	3.85
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	10:00	10.23	19.74	111.44	8.98	11.86	26.30	11.12	0.41	5.17
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	07:00	8.50	8.09	42.65	4.43	5.04	10.77	5.45	0.33	1.86
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	08:00	7.93	9.91	62.65	5.32	6.85	14.68	6.23	0.42	2.67
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	09:00	9.77	12.10	53.25	5.97	6.10	13.73	5.80	0.24	3.63
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	10:00	8.51	12.94	42.86	7.16	5.04	11.76	5.37	0.11	5.48
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	07:00	10.12	18.67	106.00	7.11	11.80	27.66	14.29	0.81	2.11
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	08:00	8.45	14.33	63.59	6.31	8.14	19.17	11.44	0.46	2.47
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	09:00	10.04	16.52	63.47	6.70	7.49	17.69	10.83	0.33	3.68
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	10:00	9.15	16.54	46.99	7.35	5.75	14.62	7.93	0.11	5.12
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	07:00	23.63	30.43	221.46	10.45	24.74	55.23	23.01	2.02	3.30
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	08:00	14.32	18.34	124.07	7.60	15.44	35.09	11.64	0.68	2.89
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	09:00	12.24	13.84	77.11	6.79	8.77	20.37	7.88	0.26	3.68
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	10:00	14.42	23.55	97.63	9.75	10.65	25.53	13.64	0.31	5.93
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	07:00	19.88	32.31	267.95	11.81	25.88	61.32	23.44	1.35	3.40
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	08:00	14.60	21.18	161.31	10.15	16.67	39.25	14.86	0.66	4.45
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	09:00	17.26	23.77	127.71	10.30	13.13	31.18	11.85	0.32	5.26
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	10:00	16.38	25.27	135.88	10.81	13.93	33.56	14.76	0.25	6.68
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	07:00	18.12	23.77	124.89	9.68	15.10	36.51	15.10	0.69	3.85
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	08:00	11.76	29.73	102.70	13.91	11.42	27.54	16.38	0.48	6.17
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	09:00	8.40	19.09	64.33	9.13	6.44	16.79	8.90	0.11	6.32
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	10:00	6.01	17.26	13.26	11.24	1.77	5.37	2.80	0.11	7.93

Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación) 80

Sitio	Fecha	ciclopentano	c-2-buteno	isopentano	n-pentano	1-penteno	ciclohexano	2,3-dimetilbutano + 2-metilpentano	3-metilpentano	n-hexano	isopreno
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	3.88	1.09	15.05	6.35	0.81	2.01	9.49	2.98	3.85	0.65
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	1.93	0.50	7.86	3.53	0.57	1.08	4.62	1.45	1.91	0.20
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	1.82	0.46	8.31	3.93	0.37	1.05	5.12	1.28	2.02	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	1.33	0.25	6.96	3.37	0.41	1.01	3.57	1.24	1.89	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	7.04	2.13	23.77	10.43	1.04	4.19	16.58	6.43	11.76	0.85
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	5.19	1.53	20.44	12.51	1.10	2.97	13.83	5.31	7.17	0.87
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	1.97	0.53	9.30	4.05	0.51	1.23	6.00	1.17	2.46	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	1.66	0.23	7.51	3.42	0.61	1.03	5.02	1.52	2.13	0.27
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.72	0.28	2.64	1.55	0.24	0.89	1.71	0.88	2.36	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	1.03	0.33	3.90	2.27	0.40	0.91	2.77	0.96	1.91	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.74	0.11	3.84	2.15	0.31	0.79	2.39	1.11	2.15	0.25
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.75	0.11	3.25	1.98	0.41	0.71	2.10	0.81	1.45	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	2.29	0.63	7.72	4.20	0.50	1.30	5.66	1.74	2.24	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	1.63	0.38	6.59	3.54	0.49	1.35	4.92	1.77	2.33	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	1.26	0.28	5.73	3.44	0.50	1.19	3.99	1.68	3.09	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.93	0.11	4.00	2.40	0.48	1.03	3.36	1.05	2.08	0.21
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	4.09	1.43	13.18	6.37	0.73	2.46	9.02	4.08	8.08	0.65
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	1.88	0.51	7.93	4.59	0.54	2.28	7.73	2.75	6.32	0.21
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.94	0.24	5.56	3.18	0.40	1.03	4.16	1.35	2.07	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	1.46	0.27	8.34	5.23	0.39	1.66	6.51	2.04	3.53	0.22
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	3.64	0.96	15.70	7.57	0.86	2.00	11.74	4.00	5.23	0.33
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	2.02	0.44	9.82	5.00	1.27	0.21	0.39	2.50	2.44	6.30
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	1.48	0.31	8.51	4.02	0.49	1.24	6.06	1.88	2.75	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	1.55	0.22	9.85	4.46	0.58	1.48	5.73	2.19	2.45	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	2.41	0.46	9.03	3.65	0.54	1.42	6.09	2.00	3.27	0.29
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	2.58	0.42	9.47	3.96	0.77	1.15	5.28	1.87	2.08	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	1.34	0.11	5.42	2.32	0.45	0.75	2.91	1.34	1.73	0.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	1.33	0.11	1.88	1.09	0.56	1.04	0.39	0.31	1.26	0.10

Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación) 81

Sitio	Fecha	1-hexeno	metilciclohexano	2,3-dimetilpentano + 3-metilhexano + 2-metilhexano	n-heptano	benceno	2,3,4-trimetilpentano	3-metilheptano	2-metilheptano	n-octano
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.52	0.69	3.06	1.13	2.73	1.58	1.37	0.47	0.75
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.32	0.45	1.71	0.55	1.66	1.51	1.18	0.34	0.47
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.36	0.40	1.63	0.69	1.71	1.70	1.47	0.57	0.56
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.35	0.34	1.26	0.45	1.47	0.67	0.32	0.31	0.34
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.74	0.93	7.35	2.09	3.74	4.21	3.93	1.57	0.80
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.54	0.66	4.41	1.35	3.76	3.59	2.79	1.06	1.57
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.38	0.29	1.80	0.57	1.73	1.07	1.19	0.32	0.39
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.34	0.36	1.48	0.52	1.61	1.00	1.16	0.35	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.10	0.21	0.74	0.29	0.99	0.21	0.41	0.11	0.27
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.10	0.28	0.89	0.34	1.27	0.55	0.53	0.11	0.28
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.10	0.27	0.79	0.38	1.24	0.49	0.52	0.11	0.27
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.28	0.11	0.74	0.38	1.11	0.49	0.48	0.11	0.29
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.33	0.59	1.72	0.51	1.63	1.06	0.94	0.23	0.29
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.32	0.44	1.59	0.57	1.63	1.05	0.94	0.26	0.33
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.34	0.31	1.32	0.49	1.51	0.87	0.68	0.11	0.34
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.33	0.40	0.79	0.39	1.25	0.52	0.51	0.11	0.11
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.46	0.81	2.91	1.13	2.21	1.52	1.53	0.38	0.61
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.59	0.76	5.71	1.33	1.77	0.98	0.95	0.11	0.45
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.35	0.38	1.33	0.59	1.36	0.57	0.52	0.11	0.26
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.50	0.33	3.41	0.99	1.69	0.93	0.89	0.21	0.33
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.55	0.63	2.80	0.87	2.21	1.75	1.66	0.45	0.57
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.10	0.41	1.46	0.63	1.71	1.18	1.00	0.30	0.35
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.78	0.50	1.69	0.70	1.83	0.93	0.85	0.11	0.38
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.50	0.34	1.46	0.69	1.59	0.98	1.00	0.24	0.50
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.46	0.61	2.27	0.75	1.60	1.22	1.15	0.23	0.39
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.59	0.39	1.57	0.55	1.58	1.32	1.22	0.26	0.54
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.45	0.27	0.80	0.44	1.29	0.71	0.69	0.11	0.33
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.58	0.30	0.97	0.59	0.97	0.21	0.26	0.11	0.24

Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación) 82

Sitio	Fecha	tolueno	n-nonano	etilbenceno	p-xileno	m-xileno	o-xileno	MTBE	2-butanona	estireno	1-etil-4-metil benceno	1,3,5-trimetil benceno	1,2,4-trimetilbenceno
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	15.52	0.53	7.83	0.84	1.96	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	8.54	0.39	6.77	0.89	0.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	10.36	0.26	5.62	0.67	1.12	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	9.46	0.35	4.97	0.31	0.74	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	28.28	0.46	8.57	0.86	2.85	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	27.10	0.90	11.42	1.15	2.51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	13.53	0.40	6.64	1.18	1.54	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	11.50	0.26	5.09	0.79	0.97	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	4.50	0.11	3.18	0.31	0.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	5.33	0.23	3.30	0.31	0.72	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	5.53	0.24	3.62	0.31	0.70	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	6.77	0.33	3.07	0.31	0.31	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	8.82	0.11	4.07	0.31	1.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	8.06	0.22	5.17	0.31	1.23	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	8.59	0.23	5.19	0.63	1.22	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	7.22	0.11	3.88	0.31	0.85	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	17.63	0.29	5.73	0.31	1.61	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	26.75	0.40	6.65	0.98	1.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	58.86	0.30	5.40	0.31	0.94	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	27.58	0.22	5.13	0.31	1.40	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	27.61	0.40	8.02	0.31	1.67	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	14.82	0.28	6.38	0.31	1.13	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	14.40	0.33	5.96	0.31	0.87	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	13.24	0.31	5.84	0.31	1.14	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	11.93	0.39	6.11	0.31	1.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	10.96	0.35	5.55	0.31	1.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	7.53	0.27	4.18	0.31	0.76	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	12.89	0.11	4.38	0.31	0.31	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND.- No detectado

Anexo 3. Resultados (ppbV) por cromatografía de gases de las muestras de Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación)

Sitio	Fecha	t-2-penteno	metilciclopentano	c-2-penteno	2,2-dimetilbutano	2,4-dimetilpentano	isooctano
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.63	0.46	0.11	0.62	5.08	3.09
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.30	0.50	0.11	0.43	5.08	1.52
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	1.89
Iztapalapa, Cd. Mex.	02-feb	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.93	0.78	3.37	2.20	5.08	5.42
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	1.19	0.77	0.71	1.74	5.08	4.84
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	1.31
Iztapalapa, Cd. Mex.	07-feb	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	04-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.30	0.20	0.11	0.63	5.08	1.38
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.30	0.20	0.11	0.62	5.08	1.25
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.92
Iztapalapa, Cd. Mex.	09-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.30	0.20	3.29	1.46	5.08	2.53
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.30	0.20	0.95	0.75	5.08	1.12
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.30	0.20	0.11	0.44	5.08	0.41
Iztapalapa, Cd. Mex.	10-mar	0.30	0.20	0.11	0.79	5.08	1.21
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.71	0.50	0.11	0.87	5.08	3.19
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.30	0.62	0.46	0.20	5.08	1.94
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.30	0.20	0.11	0.61	5.08	1.55
Iztapalapa, Cd. Mex.	23-mar	0.30	0.20	0.11	0.70	5.08	1.77
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.30	0.20	0.43	0.53	5.08	2.27
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.30	0.20	0.11	0.50	5.08	2.53
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.30	0.20	0.11	0.20	5.08	1.10
Iztapalapa, Cd. Mex.	28-mar	0.30	0.68	0.11	0.20	5.08	0.41

Anexo 4. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en el Valle de Toluca

84

Compuesto	etano	propano	n-butano	isobutano	isopentano	n-pentano	ciclopentano	3-metilpentano	2,3-dimetilbutano
propano	0.8								
n-butano	0.6	0.8							
isobutano	0.6	0.8	1.0						
isopentano	0.9	0.9	0.5	0.5					
n-pentano	0.8	<u>0.7</u>	0.3	0.4	1.0				
ciclopentano	0.9	0.8	0.6	0.6	0.9	0.9			
3-metilpentano	0.8	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9		
2,3-dimetilbutano	0.8	0.9	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.9	0.8	0.9	0.9	
n-hexano	0.7	0.9	0.6	0.6	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0
ciclohexano	0.5	0.8	0.6	0.6	<u>0.7</u>	0.6	0.6	0.8	0.8
metilciclohexano	<u>0.7</u>	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
2,3-dimetilpentano	0.8	0.8	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
n-heptano	0.8	0.8	0.5	0.5	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9
2,3,4-trimetilpentano	0.8	<u>0.7</u>	0.5	0.5	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.8	<u>0.7</u>	0.8
3-metilheptano	<u>0.7</u>	0.8	0.6	0.6	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.9	0.9
2-metilheptano	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4
n-octano	0.8	0.8	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
n-nonano	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
etileno	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
propileno	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
t-2-buteno	0.9	0.8	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
c-2-buteno	0.2	0.4	0.8	0.8	0.1	-0.1	0.2	0.2	0.3
1-buteno	0.8	0.8	0.5	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
1-penteno	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
1-hexeno	0.8	0.8	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8
acetileno	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
isopreno	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2
benceno	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.8	<u>0.7</u>	0.8
tolueno	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.5	0.6	0.6	<u>0.7</u>
etilbenceno	0.3	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6
p-xileno	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
m-xileno	0.5	0.6	0.3	0.3	0.6	0.6	<u>0.7</u>	0.8	0.6
o-xileno	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
1-etil-4-metilbenceno	0.5	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
1,3,5-trimetilbenceno	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
1,2,4-trimetilbenceno	0.6	<u>0.7</u>	0.5	0.5	<u>0.7</u>	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>
estireno	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
MTBE	0.6	<u>0.7</u>	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	<u>0.7</u>	0.8
2-butanona	0.6	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4

Compuesto	n-hexano	ciclohexano	metilciclohexano	2,3-dimetilpentano	n-heptano	2,3,4-trimetilpentano	3-metilheptano	2-metilheptano	n-octano
propano									
n-butano									
isobutano									
isopentano									
n-pentano									
ciclopentano									
3-metilpentano									
2,3-dimetilbutano									
n-hexano									
ciclohexano	0.9								
metilciclohexano	0.9	0.9							
2,3-dimetilpentano	0.9	0.8	0.9						
n-heptano	0.9	0.8	0.9	1.0					
2,3,4-trimetilpentano	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8				
3-metilheptano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7			
2-metilheptano	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4		
n-octano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.4	
n-nonano	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.5	0.8	0.4	0.8
etileno	0.9	0.6	0.8	0.9	0.9	0.7	0.8	0.4	0.8
propileno	0.9	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7	0.8	0.4	0.9
t-2-buteno	0.8	0.6	0.7	0.9	0.9	0.7	0.8	0.3	0.8
c-2-buteno	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	-0.1	0.2
1-buteno	0.7	0.5	0.7	0.8	0.8	0.6	0.8	0.3	0.8
1-penteno	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.0	0.1
1-hexeno	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.4	0.9
acetileno	0.9	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.4	0.8
isopreno	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3
benceno	0.7	0.5	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.3	0.7
tolueno	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6
etilbenceno	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.1	0.3
p-xileno	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.3	0.7	0.1	0.7
m-xileno	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.3	0.6	0.2	0.7
o-xileno	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3	0.7
1-etil-4-metilbenceno	0.6	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.2	0.7
1,3,5-trimetilbenceno	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3	0.7
1,2,4-trimetilbenceno	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3	0.7
estireno	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MTBE	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3	0.7
2-butanona	0.3	0.1	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4

Anexo 4. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en el Valle de Toluca (Continuación)

Compuesto	n-nonano	etileno	propileno	t-2-buteno	c-2-buteno	1-buteno	1-penteno	1-hexeno	acetileno
propano									
n-butano									
isobutano									
isopentano									
n-pentano									
ciclopentano									
3-metilpentano									
2,3-dimetilbutano									
n-hexano									
ciclohexano									
metilciclohexano									
2,3-dimetilpentano									
n-heptano									
2,3,4-trimetilpentano									
3-metilheptano									
2-metilheptano									
n-octano									
n-nonano									
etileno	0.6								
propileno	<u>0.7</u>	1.0							
t-2-buteno	0.5	1.0	0.9						
c-2-buteno	0.0	0.2	0.2	0.3					
1-buteno	0.5	0.9	0.9	1.0	0.3				
1-penteno	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1			
1-hexeno	<u>0.7</u>	0.9	0.9	0.8	0.2	0.8	0.0		
acetileno	0.6	1.0	1.0	1.0	0.3	0.9	0.1	0.8	
isopreno	0.4	0.1	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.3	0.0
benceno	0.5	0.8	0.8	0.8	0.3	<u>0.7</u>	0.1	<u>0.7</u>	0.8
tolueno	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.1	0.5	0.6
etilbenceno	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	0.4
p-xileno	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.4	<u>0.7</u>	0.0	0.6	<u>0.7</u>
m-xileno	0.6	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.6	0.0	0.6	0.1	0.6	0.6
o-xileno	0.4	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.5	0.6	0.0	0.6	<u>0.7</u>
1-etil-4-metilbenceno	0.5	0.6	0.6	0.6	0.2	0.5	0.0	0.6	0.6
1,3,5-trimetilbenceno	0.6	0.6	0.6	0.5	0.2	0.5	0.1	0.6	0.6
1,2,4-trimetilbenceno	0.5	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.3	0.6	0.1	0.6	<u>0.7</u>
estireno	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.1
MTBE	0.5	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.4	0.6	0.2	0.6	<u>0.7</u>
2-butanona	0.1	0.5	0.5	0.6	0.2	0.6	-0.1	0.5	0.6

Compuesto	isopreno	benceno	tolueno	etilbenceno	p-xileno	m-xileno	o-xileno	1-etil-4-metilbenceno	1,3,5-trimetilbenceno
propano									
n-butano									
isobutano									
isopentano									
n-pentano									
ciclopentano									
3-metilpentano									
2,3-dimetilbutano									
n-hexano									
ciclohexano									
metilciclohexano									
2,3-dimetilpentano									
n-heptano									
2,3,4-trimetilpentano									
3-metilheptano									
2-metilheptano									
n-octano									
n-nonano									
etileno									
propileno									
t-2-buteno									
c-2-buteno									
1-buteno									
1-penteno									
1-hexeno									
acetileno									
isopreno									
benceno	0.0								
tolueno	-0.1	0.9							
etilbenceno	-0.1	0.3	0.5						
p-xileno	0.2	0.6	0.5	0.4					
m-xileno	0.3	0.5	0.2	0.0	0.8				
o-xileno	0.0	1.0	0.9	0.4	0.6	0.4			
1-etil-4-metilbenceno	0.1	0.9	<u>0.7</u>	0.2	0.6	0.5	0.9		
1,3,5-trimetilbenceno	0.2	0.9	<u>0.7</u>	0.3	0.6	0.5	0.9	1.0	
1,2,4-trimetilbenceno	0.1	1.0	0.8	0.3	0.6	0.5	1.0	1.0	0.9
estireno	0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
MTBE	0.0	0.9	0.9	0.4	0.6	0.5	1.0	0.9	0.9
2-butanona	0.0	0.5	0.5	0.0	0.2	0.1	0.5	0.3	0.3

Compuesto	1,2,4-trimetilbenceno	estireno	MTBE
propano			
n-butano			
isobutano			
isopentano			
n-pentano			
ciclopentano			
3-metilpentano			
2,3-dimetilbutano			
n-hexano			
ciclohexano			
metilciclohexano			
2,3-dimetilpentano			
n-heptano			
2,3,4-trimetilpentano			
3-metilheptano			
2-metilheptano			
n-octano			
n-nonano			
etileno			
propileno			
t-2-buteno			
c-2-buteno			
1-buteno			
1-penteno			
1-hexeno			
acetileno			
isopreno			
benceno			
tolueno			
etilbenceno			
p-xileno			
m-xileno			
o-xileno			
1-etil-4-metilbenceno			
1,3,5-trimetilbenceno			
1,2,4-trimetilbenceno			
estireno	-0.1		
MTBE	1.0	-0.1	
2-butanona	0.5	0.0	0.5

Anexo 5. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México ⁸⁹

Compuesto	etano	propano	n-butano	isobutano	2,2-dimetilbutano	ciclopentano	isopentano	n-pentano	metilciclopentano
propano	0.9								
n-butano	0.9	1.0							
isobutano	0.9	1.0	1.0						
2,2-dimetilbutano	0.9	0.9	0.9	0.9					
ciclopentano	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9				
isopentano	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0			
n-pentano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0		
metilciclopentano	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6	0.6	
ciclohexano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.5
2,3-dimetilbutano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.5
3-metilpentano	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.6
n-hexano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.5
metilciclohexano	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.4
2,3-dimetilpentano	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5
n-heptano	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6
2,3,4-trimetilpentano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7
2-metilheptano	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7
3-metilheptano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6
n-octano	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.6
isooctano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.7
n-nonano	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5
etileno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6
propileno	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7
t-2-buteno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.6
c-2-buteno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.6
1-buteno	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
1-penteno	0.6	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
t-2-penteno	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.7
c-2-penteno	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.3
1-hexeno	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.3
acetileno	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.6
isopreno	0.2	0.3	0.3	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.4
benceno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.6
tolueno	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3
etilbenceno	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7
p-xileno	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4
m-xileno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	0.5

Anexo 5. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación) 90

Compuesto	ciclohexano	2,3-dimetilbutano	3-metilpentano	n-hexano	metilciclohexano	2,3-dimetilpentano	n-heptano	2,3,4-trimetilpentano	2-metilheptano
propano									
n-butano									
isobutano									
2,2-dimetilbutano									
ciclopentano									
isopentano									
n-pentano									
metilciclopentano									
ciclohexano									
2,3-dimetilbutano	0.9								
3-metilpentano	0.9	0.9							
n-hexano	0.9	0.9	0.9						
metilciclohexano	0.8	0.8	0.8	0.8					
2,3-dimetilpentano	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8				
n-heptano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0			
2,3,4-trimetilpentano	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8		
2-metilheptano	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.7	0.8	1.0	
3-metilheptano	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0
n-octano	0.7	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8
isooctano	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9
n-nonano	0.6	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6
etileno	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8
propileno	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7
t-2-buteno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
c-2-buteno	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
1-buteno	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1
1-penteno	0.5	0.5	0.8	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	0.6
t-2-penteno	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.9	0.8
c-2-penteno	0.7	0.6	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
1-hexeno	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.5	0.4
acetileno	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
isopreno	-0.1	-0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
benceno	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9
tolueno	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3
etilbenceno	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7
p-xileno	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5
m-xileno	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8

Anexo 5. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación)

Compuesto	3-metilheptano	n-octano	isooctano	n-nonano	etileno	propileno	t-2-buteno	c-2-buteno	1-buteno
propano									
n-butano									
isobutano									
2,2-dimetilbutano									
ciclopentano									
isopentano									
n-pentano									
metilciclopentano									
ciclohexano									
2,3-dimetilbutano									
3-metilpentano									
n-hexano									
metilciclohexano									
2,3-dimetilpentano									
n-heptano									
2,3,4-trimetilpentano									
2-metilheptano									
3-metilheptano									
n-octano	0.8								
isooctano	0.9	0.8							
n-nonano	0.6	0.9	<u>0.7</u>						
etileno	0.9	0.8	0.9	<u>0.7</u>					
propileno	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.6	0.9				
t-2-buteno	0.9	0.8	0.9	0.6	0.8	<u>0.7</u>			
c-2-buteno	0.9	0.8	0.9	0.6	0.9	<u>0.7</u>	1.0		
1-buteno	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.4	-0.3	-0.3	
1-penteno	<u>0.7</u>	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.1
t-2-penteno	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.8	0.8	-0.1
c-2-penteno	<u>0.7</u>	0.4	0.6	0.2	0.6	0.5	0.8	0.8	-0.1
1-hexeno	0.5	0.4	0.6	0.4	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	0.4	0.4	0.4
acetileno	0.9	0.8	1.0	<u>0.7</u>	0.9	0.8	0.9	0.9	-0.1
isopreno	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0
benceno	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	-0.2
tolueno	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.0
etilbenceno	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>	-0.1
p-xileno	0.5	0.6	0.4	0.6	0.4	0.3	0.5	0.5	-0.2
m-xileno	0.9	0.8	0.9	<u>0.7</u>	0.9	<u>0.7</u>	0.9	0.9	-0.2

Anexo 5. Matriz de correlación de Pearson de los compuestos orgánicos volátiles del muestreo en Iztapalapa en la Ciudad de México (Continuación)

Compuesto	1-penteno	t-2-penteno	c-2-penteno	1-hexeno	acetileno	isopreno	benceno	tolueno	etilbenceno	p-xileno
propano										
n-butano										
isobutano										
2,2-dimetilbutano										
ciclopentano										
isopentano										
n-pentano										
metilciclopentano										
ciclohexano										
2,3-dimetilbutano										
3-metilpentano										
n-hexano										
metilciclohexano										
2,3-dimetilpentano										
n-heptano										
2,3,4-trimetilpentano										
2-metilheptano										
3-metilheptano										
n-octano										
isooctano										
n-nonano										
etileno										
propileno										
t-2-buteno										
c-2-buteno										
1-buteno										
1-penteno										
t-2-penteno	<u>0.7</u>									
c-2-penteno	0.4	0.4								
1-hexeno	0.3	0.4	0.3							
acetileno	0.8	0.8	<u>0.7</u>	0.5						
isopreno	<u>0.7</u>	0.1	0.1	-0.3	0.2					
benceno	<u>0.7</u>	0.9	0.6	0.5	1.0	0.2				
tolueno	<u>0.3</u>	0.4	0.3	0.4	0.4	0.1	0.4			
etilbenceno	<u>0.7</u>	0.8	0.4	0.5	0.8	0.2	0.9	0.5		
p-xileno	0.3	0.5	0.2	0.2	0.5	0.0	0.6	0.2	<u>0.7</u>	
m-xileno	0.7	0.8	0.6	0.5	1.0	0.1	0.9	0.4	0.8	0.6

