

Medición de precursores de ozono INFORME FINAL

**RESPONSABLES: ELIZABETH VEGA Y
RICARDO TORRES**

COLABORADORES:

ANA KAREN PORTILLO

EMMA BUENO

ROCÍO GARCÍA

GEMA ANDRACA

VICTOR ALMANZA

VALERIA REYES CLIMACO

DANIEL DÍAZ GALINDO

31 de enero, 2024

*MUESTREO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COVs)
EN AIRE AMBIENTE*

SEPTIEMBRE - DICIEMBRE DE 2023

Resumen

Derivado del “Proyecto de Medición de Precursores de Ozono” el presente informe está dirigido al Monitoreo Continuo de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) precursores de ozono, realizado durante los meses de septiembre a diciembre de 2023, en el sitio receptor ubicado en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, de la UNAM.

El equipo utilizado para el monitoreo continuo de COVs consiste en un sistema que comprende un cromatógrafo de gases con detector de ionización por flama (GC-FID) en donde se determinó la concentración diurna de 57 COVs, identificados por la red PAMS (Photochemical Assessment Monitoring Stations) de USA como, precursores de ozono debido a su alta concentración en la atmósfera, reactividad para formar ozono troposférico, por clasificarse como contaminante atmosférico peligroso y/o por ser precursores de aerosoles orgánicos secundarios.

Durante el periodo de muestreo se observó que los compuestos con mayor concentración promedio son en orden descendiente, el propano (72.26 ppbV), i-butano (5.09 ppbV), n-butano (9.08 ppbV), acetileno (4.12 ppbV), i-pentano, (5.62 ppbV), n-pentano (3.76 ppbV), n-hexano (3.02 ppbV) y tolueno (4.33 ppbV).

En relación a las concentraciones promedio horario por grupos (alcanos, alquenos, aromáticos); el grupo de los alcanos presentan mayor concentración durante todo el muestreo diurno en los meses de noviembre y diciembre de 2023 (164.607 ppbV y 11.927 ppbV, respectivamente) entre las 8 y 9 horas en la mañana.

Los compuestos aromáticos presentan mayor concentración que los alcanos y alquenos en las mediciones diurnas realizadas en noviembre y diciembre de 2023; con 10.386 ppbV en noviembre y 12.792 ppbV en diciembre entre 8 y 9 horas.

En general el promedio de contribución descendente por familia fue alcanos > alquenos > aromáticos > acetileno. Los alcanos contribuyeron en un intervalo de concentración de 63-179 ppbV con un promedio de 109 ppbV, lo que representa el 82.4% de los COVs totales, así mismo los alquenos estuvieron presentes en concentraciones de 5.8-15.9 con un promedio de 9.9 ppbV (7.6 % COVT), los aromáticos en el intervalo de 4.7-12.4 y un promedio de concentración de 8.5 ppbV (6.7 % COVT) y el acetileno 2.6-6.2 y un promedio de concentración de 4.1 ppbV (3.3 % COVT).

El monitoreo continuo de COVs permitirá el desarrollo de una base de datos de precursores de ozono para conocer las concentraciones diurnas y el comportamiento de estos contaminantes en la atmósfera; lo cual se traduce en información que da soporte y sustento a las medidas para reducir las emisiones de COVs como precursores de ozono.

De la aplicación preliminar del modelo WRF-CHEM se observó que el modelo sobreestima la concentración de NO, NO₂ e hidrocarburos (propano), así como del Peroxiacetil Nitrato (PAN) y del nitrógeno reactivo total (NO_y). Se requiere calibrar el modelo revisando el perfil de emisión de NO_x, y COVs con base en las mediciones para este periodo de datos que se genere.

El modelo reproduce el comportamiento de la concentración de ozono para casi todos los días del periodo considerado. Sin embargo, se sobreestimó el pico del día 19 de noviembre de manera considerable. Debido a que se tuvieron 3 frentes fríos en este periodo de simulación, se sugiere que esta sobreestimación puede ser ocasionada por errores de transporte en el modelo. Actualmente se revisa la configuración para mejorar el desempeño del modelo para este periodo.

Contenido

1. Antecedentes.....	6
1.1 COVs PAMS prioritarios y opcionales.....	8
2. Medición Automática de COVs.....	9
2.1 AirmoVOC C2-C6.....	10
2.2 AirmoVOC C6-C12.....	13
3. Monitoreo de COVs en aire ambiente.....	17
3.1 Validación de Datos.....	20
Tabla 2. COVs con mayor concentración.....	25
Resultados preliminares del modelo WRF-Chem.....	34
4. Referencias.....	38

Figuras

Figura 1 Análisis in situ de VOC C2-C6 en muestra de aire ambiente.	10
Figura 2. Condiciones de análisis de una muestra de aire ambiente y resultados de concentraciones de VOC C2-C6 presentes en dicha muestra.....	11
Figura 3. Tabla de análisis de resultados.....	12
Figura 4. Especiación de COVs C2-C6 en una muestra de aire ambiente.....	13
Figura 5. Análisis in situ de COVs C6-C12 en muestra de aire ambiente.....	14
Figura 6. Condiciones de análisis de una muestra de aire ambiente y resultados de concentraciones de COVs C6-C12 presentes en dicha muestra.....	15
Figura 7. Tabla de análisis de resultados.....	16

Figura 8. Especiación de COVs C6-C12 en una muestra de aire ambiente.....	17
Figura 9. Concentración Promedio de COVs C2-C6 en muestras de aire ambiente (septiembre a diciembre, 2023).....	19
Figura 10. Concentración Promedio de COVs C6-C12 en muestras de aire ambiente (septiembre a diciembre, 2023).....	20
Figura 11. Concentración Horaria de COVs C2-C6 en muestras de aire ambiente.....	26
Figura 12. Concentración Horaria de COVs C6-C12 en muestras de aire ambiente.....	27
Figura 13. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente (noviembre, 2023).....	29
Figura 14. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente (diciembre, 2023).....	29
Figura 15. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente de noviembre-diciembre.....	31
Figura 16. Correlación entre las concentraciones de Propano y Butano durante noviembre y diciembre 2023.	32
Figura 17. Correlación entre las concentraciones de Benceno y Tolueno durante noviembre y diciembre 2023.....	32
Figura 18. Correlación entre las concentraciones de los isómeros de O-Xileno y M & P-Xileno durante noviembre y diciembre 2023..	33
Figura 19. Resultados preliminares con el modelo Modelo WRF-Chem para el periodo del 16 al 23 de noviembre de 2023.....	36
Figura 20. Proporción O ₃ /NO _y para los días 19, 20 y 21 de noviembre de 2023 a las 14hrs.....	37

Tablas

Tabla 1 . Datos estadísticos de concentración de COVs.....	18
Tabla 2 . COVs con mayor concentración.....	24
Tabla 3 . COVs C ₂ -C ₆ en grupos.....	25
Tabla 4 . COVs C ₆ -C ₁₂ en grupos.....	26

MUESTREO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COVs) EN AIRE AMBIENTE

REPORTE DE RESULTADOS

SEPTIEMBRE A DICIEMBRE DE 2023

1. Antecedentes.

El término “Monitoreo” se refiere al muestreo continuo y el uso de los datos medidos u otra información para evaluar el comportamiento de un factor de interés (en este caso, contaminantes de aire ambiente) y comparar con una norma o estado con respecto a un valor específico en relación a la calidad del aire (EPA, 2023a).

En el monitoreo de la calidad del aire ambiente se recolectan muestras de aire y se miden contaminantes de aire ambiente para evaluar la presencia de dichos contaminantes en la atmósfera, comparar con valores de las normas de calidad de aire (si es el caso) y registrar información histórica.

Con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 (SEMARNAT, 2019) dentro de los contaminantes de aire ambiente se encuentran los contaminantes criterio; es decir, “*los contaminantes normados a los que se les ha establecido un límite máximo de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud*”

humana y asegurar el bienestar de la población”; dentro de los cuales se encuentra el ozono (O₃).

El ozono a nivel de superficie (ozono troposférico) es producto de reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) cuyas fuentes principales de emisión son las fuentes móviles, plantas de procesos industriales, refinerías, plantas de procesos químicos y otras fuentes de químicos o contaminantes que reaccionan con la presencia de la luz solar (EPA,2023b) generando niveles no saludables de concentraciones de ozono en la atmósfera en ambientes urbanos. El ozono puede ser transportado a largas distancias por el viento, hasta alcanzar áreas rurales que pueden presentar altos niveles de ozono troposférico.

Los COVs se definen como compuestos orgánicos que tienen una presión de vapor superior a 10⁻¹ Torr a 25°C (Wang, et al., 2023).

En la red de Estaciones de Monitoreo de Evaluación Fotoquímica de precursores de ozono denominada red PAMS (Photochemical Assessment Monitoring Stations) operada por las agencias locales y estatales en USA se realiza el monitoreo de estos precursores que consisten en hidrocarburos, compuestos que contienen únicamente carbono e hidrógeno en su estructura química, con la excepción de algunos compuestos opcionales que también contienen cloro u oxígeno en su molécula. Estos compuestos que también contienen entre 2 y 12 átomos de carbono, se denominan COVs C₂-C₁₂.

Los COVs son emitidos por diversas fuentes que incluyen: fuentes móviles, fuentes biogénicas, (por ejemplo: bosques de pinos), producción de energía (por ejemplo: distribución, almacenamiento y consumo de gas LP, gas natural, gasolina y demás combustibles) y procesos industriales (por ejemplo: industria química, textil, refinación del petróleo y demás procesos industriales), entre otras, y generalmente se presentan concentraciones en aire ambiente desde partes por trillón (ppt) hasta cientos de partes por billón (ppb) por volumen (ppbV).

Los COVs considerados en la red PAMS que contribuyen a la formación de ozono se muestran en la Tabla siguiente:

1.1 COVs PAMS prioritarios y opcionales.

Compuestos Prioritarios		Compuestos Opcionales	
1,2,3-trimetilbenceno	m-etiltolueno	1,3,5-trimetilbenceno	Isopropilbenceno
1,2,4-trimetilbenceno	n-butano	1-penteno	m-dietilbenceno
1-buteno	n-hexano	2,2-dimetilbutano	metilciclohexano
2,2,4-trimetilpentano	n-heptano	2,3,4-trimetilpentano	metilciclopentano
benceno	o-etiltolueno	2,3-dimetilbutano	n-decano
cis-2-buteno	o-xileno	2,3-dimetilpentano	n-heptano
etano	p-etiltolueno	2,4-dimetilpentano	n-nonano
etilbenceno	propano	2-metilheptano	n-octano
etileno	propileno	2-metilhexano	n-propilbenceno
isobutano	estireno	2-metilpentano	n-undecano
isopentano	tolueno	3-metilheptano	p-dietilbenceno
isopreno	trans-2-buteno	3-metilhexano	trans-2-penteno
m&p-xilenos	carbono	3-metilpentano	α/β -pineno
	orgánico no metano	acetileno	1,3-butadieno
	total	cis-2-penteno	tetracloruro de carbono
	(TNMOC)	ciclohexano	etanol
		ciclopentano	tetracloroetileno

Los COVs PAMS designados en la categoría de “prioritarios” se refiere a que presentan las concentraciones promedio más altas ajustadas por mayor reactividad durante las horas pico de las 9 a.m. en días con alto contenido de ozono, concentraciones promedio ajustadas por reactividad alta, basadas en la geografía y por ser un contaminante

atmosférico peligroso y/o con prioridad alta por ser precursores de aerosoles orgánicos secundarios (Wang, et al., 2023).

De acuerdo con las consideraciones anteriores, para reducir la contaminación por ozono en la tropósfera, se requiere reducir o eliminar las emisiones de fuentes de COVs y, para ello, es importante realizar el monitoreo continuo de la concentración de dichos contaminantes en la atmósfera.

2. Medición Automática de COVs.

Para realizar medidas de control de emisiones de contaminantes atmosféricos, como es el caso de los COVs, es necesario realizar un monitoreo continuo para evaluar las especies o tipos de COVs precursores de ozono y concentraciones de los mismos que se presentan durante el registro a lo largo del día, y durante periodos a largo plazo, de manera que se cuente con datos o elementos que permitan desarrollar programas de calidad del aire.

El monitoreo continuo de COVs se realiza con instrumentos automatizados para el muestreo de aire ambiente, análisis de las especies de COVs y determinación de la concentración de cada especie.

Un sistema automatizado para el muestreo de COVs proporciona información sobre las concentraciones promedio horario de especies de COVs. Tal es el caso del sistema VISTACHROM.

VISTACHROM es un software para el control del sistema de monitoreo de aire ambiente que permite automatizar el sistema de monitoreo con la adquisición de señales y datos derivados de los COVs presentes en las muestras de aire, la identificación de dichas señales con su correspondiente compuesto, por medio de una tabla de referencia, el almacenamiento de los datos obtenidos, la creación de tendencias de concentraciones de los compuestos, y el control y sincronización de los módulos del sistema de

monitoreo (módulo AirmoVOC C₂-C₆, módulo AirmoVOC C₆-C₁₂, generador de aire y de hidrógeno).

2.1 AirmoVOC C₂-C₆

AirmoVOC C₂-C₆ es el módulo para el análisis de COVs en aire ambiente, donde la molécula de dichos compuestos consiste de 2 a 6 átomos de carbono (C₂-C₆). AirmoVOC C₂-C₆ está constituido por un cromatógrafo de gases de alta resolución con un detector de ionización por flama (Flame Ionization Detector; FID) y un sistema de muestreo y preparación de la muestra de aire. Los intervalos de concentración que AirmoVOC C₂-C₆ permite detectar están en el orden de 100 ppt de COVs C₂-C₆ para aire ambiente; y es posible realizar el monitoreo continuo de muestras ambientales cada hora para identificar patrones de comportamiento de concentraciones de COVs C₂-C₆ que son emitidos a la atmósfera a lo largo del día (24h).

Un ejemplo de análisis de muestras de aire ambiente *in situ* que AirmoVOC C₂-C₆ lleva a cabo lo muestra la Figura 1.

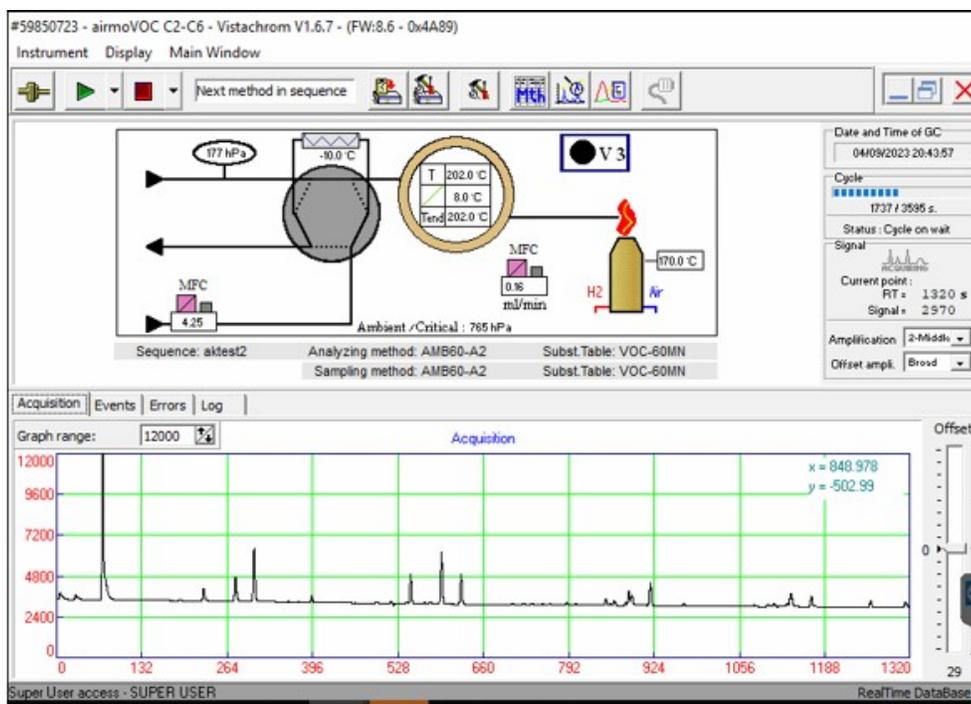


Figura 1 Análisis in situ de VOC C₂-C₆ en muestra de aire ambiente.

La Figura 1 presenta las condiciones de análisis del cromatógrafo de gases (parte superior) con el propósito de verificar el buen desempeño del equipo durante el tiempo en que se realiza la separación e identificación de los COVs C₂-C₆ que se encuentran como mezcla de gases en una muestra de aire. Cada señal (pico) que se registra en el cromatograma (gráfica) corresponde a un compuesto con pesos moleculares (PM) diferentes que comprenden desde 2 hasta 6 átomos de carbono (C₂-C₆). Los compuestos más ligeros son registrados a los pocos segundos de comenzar el análisis debido a su PM más bajo y su menor afinidad al sistema de separación de compuestos (columna cromatográfica). El área bajo la curva de cada señal (pico) corresponde a la concentración del compuesto en cuestión.

Con los resultados obtenidos por AirmoVOC C₂-C₆ para cada muestra (cromatograma) es posible visualizar las condiciones de análisis del cromatógrafo y las concentraciones de cada uno de los compuestos presentes en dicha muestra (Figura 2).

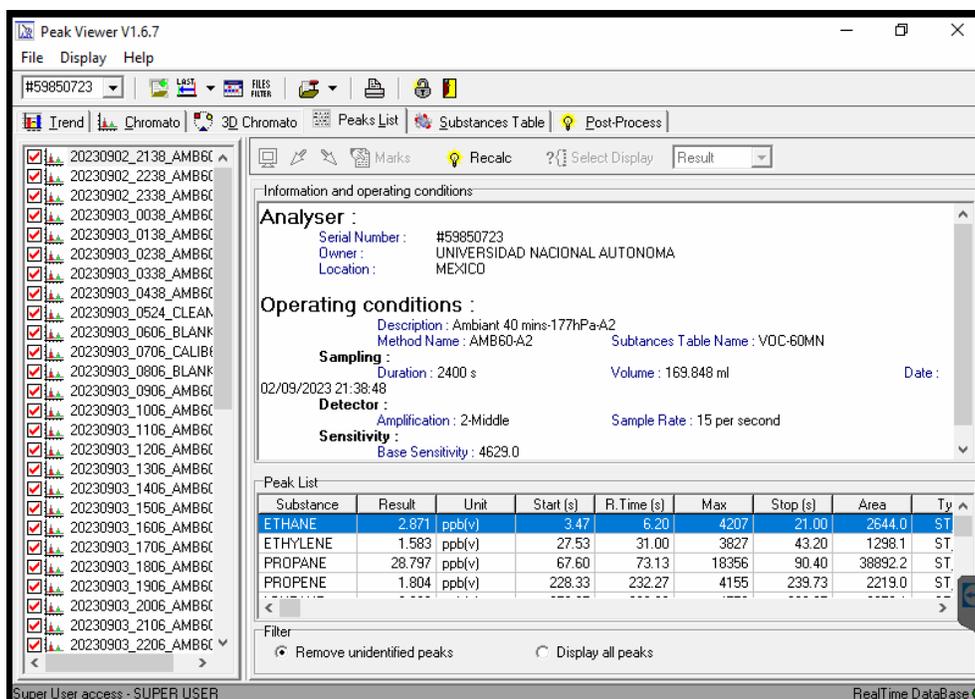


Figura 2. Condiciones de análisis de una muestra de aire ambiente y resultados de concentraciones de VOC C₂-C₆ presentes en dicha muestra.

AirmoVOC C₂-C₆ presenta también una tabla de análisis de resultados que permite verificar parámetros de control de calidad (tiempo de retención y factor de respuesta) y condiciones para el cálculo de los resultados obtenidos en concentración de cada compuesto analizado. La Figura 3 es un ejemplo de esta tabla.

#59850723 - airmoVOC C2-C6 - Analysis results

Operating conditions
 Sequence: aktest2
 Method: AMB60-A2
 Substance table: VOC-60MN
 Cycle duration: 3595
 Acquisition duration: 1320
 Sampling date: 04/09/23 18:34

#	Ret. Time	Substance	Peak area	Results	Units	Area offset	Factor	Standard	Alarm
1	6.4	ETHANE	2493	2.710	ppb(v)	0	1.050		
2	30.5	ETHYLENE	3463	4.228	ppb(v)	0	1.100		
3	71.9	PROPANE	96503	71.529	ppb(v)	0	1.050		
4	227.9	PROPENE	3893	3.168	ppb(v)	0	1.100		
5	0.0	I-BUTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.000		
6	0.0	N-BUTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.000		
7	394.6	ACETYLENE	2500	2.690	ppb(v)	0	0.900		
8	495.3	TRANS-2-BUTENE	380	0.206	ppb(v)	0	0.980		
9	517.1	1-BUTENE	1121	0.610	ppb(v)	0	0.980		
10	569.2	CIS-2-BUTENE	295	0.160	ppb(v)	0	0.980		
11	588.4	CYCLOPENTANE	59	0.026	ppb(v)	0	1.000		
12	0.0	I-PENTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.000		
13	0.0	N-PENTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.000		

Functions
 Base sensitivity: 4629.00
 Molar volume used: 24.45 dm3
 Sample volume : 169.67 ml

Figura 3. Tabla de análisis de resultados.

La etapa siguiente de AirmoVOC C₂-C₆ es identificar en el cromatograma cada uno de los compuestos de interés (identificar por especie de compuesto) y registrar las concentraciones obtenidas; es decir, se obtiene la especiación de COVs C₂-C₆ en la muestra de aire ambiente (Figura 4). En esta etapa se obtienen resultados preliminares que deben ser analizados y verificados con los controles de calidad y la experiencia del analista de manera tal que la trazabilidad de todo el proceso de análisis de las muestras se traduzca en resultados confiables.

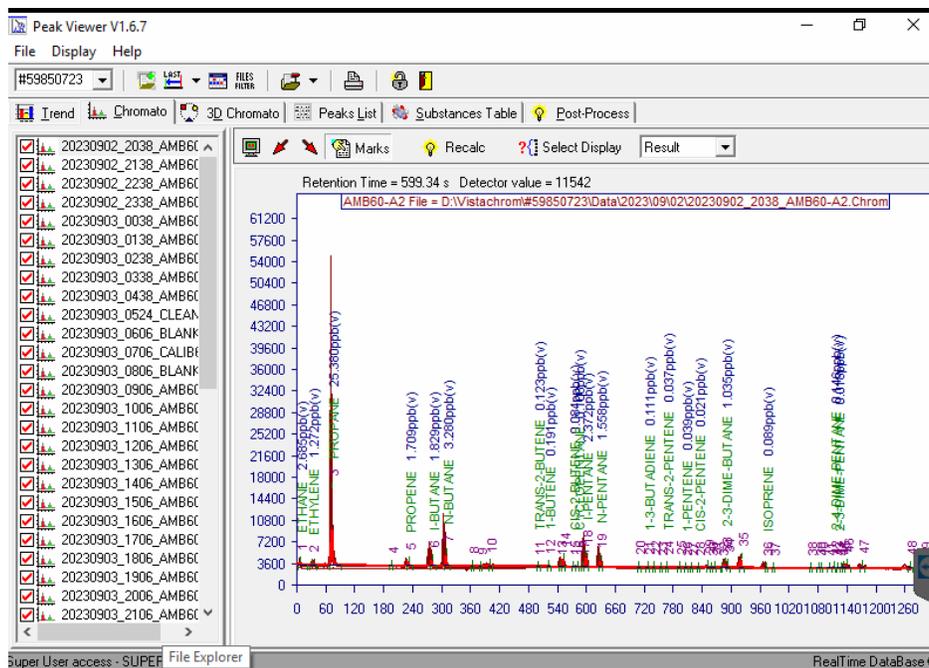


Figura 4. Especiación de COVs C2-C6 en una muestra de aire ambiente.

Finalmente, después del registro de resultados que han sido sometidos a los procedimientos de control de calidad, con AirmoVOC C₂-C₆ es posible obtener tendencias diurnas de los compuestos con un muestreo horario de aire ambiente, y evaluar las concentraciones de COVs C₂-C₆ en dicha muestra.

2.2 AirmoVOC C6-C12

AirmoVOC C₆-C₁₂ es el otro módulo que forma parte del sistema de monitoreo para el análisis de muestras de aire ambiente similar a AirmoVOC C₂-C₆. Sin embargo, los compuestos susceptibles de análisis en AirmoVOC C₆-C₁₂ comprenden en su molécula de 6 a 12 átomos de carbono.

AirmoVOC C₆-C₁₂ también es un cromatógrafo de gases de alta resolución con un detector de ionización por flama (Flame Ionization Detector; FID) y un sistema de muestreo y preparación de la muestra de aire. Los intervalos de concentración que AirmoVOC C₆-C₁₂ detecta se encuentran en el orden de 100 ppt de COVs C₆-C₁₂ para aire ambiente; y realiza monitoreo continuo de muestras ambientales cada hora para identificar patrones de

comportamiento de concentraciones de COVs C₆-C₁₂ emitidos a la atmósfera en horario diurno.

Un ejemplo de análisis de muestras de aire ambiente *in situ* que AirmoVOC C₆-C₁₂ lleva a cabo lo muestra la Figura 5.

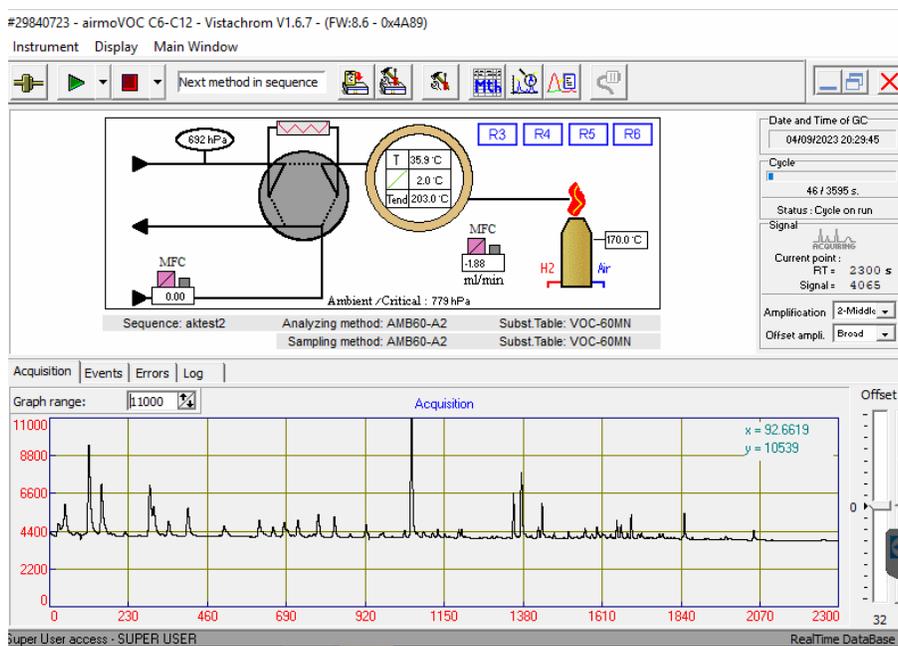


Figura 5. Análisis *in situ* de COVs C₆-C₁₂ en muestra de aire ambiente.

La Figura 5 muestra condiciones de análisis del cromatógrafo de gases (parte superior) para verificar el desempeño del equipo durante el tiempo en que se realiza la separación e identificación de los COVs C₆-C₁₂ en una muestra de aire. Cada señal (pico) que se registra en el cromatograma (gráfica) corresponde a un compuesto con pesos moleculares (PM) diferentes que comprenden desde 6 hasta 12 átomos de carbono (C₆-C₁₂). Los compuestos más ligeros son registrados a los pocos segundos de comenzar el análisis debido a su PM más bajo y su menor afinidad al sistema de separación de compuestos (columna cromatográfica). El área bajo la curva de cada señal (pico) corresponde a la concentración del compuesto en cuestión.

Con los resultados obtenidos por AirmoVOC C₆-C₁₂ para cada muestra (cromatograma) se presentan las condiciones de análisis del cromatógrafo y las concentraciones de cada uno de los compuestos presentes en dicha muestra (Figura 6).

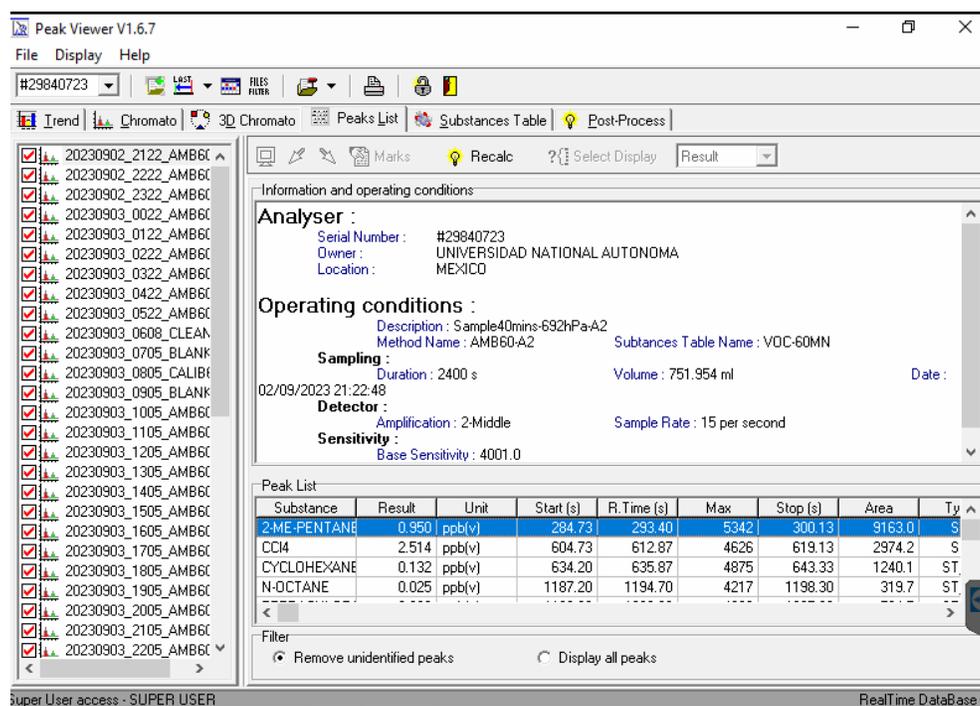


Figura 6. Condiciones de análisis de una muestra de aire ambiente y resultados de concentraciones de COVs C₆-C₁₂ presentes en dicha muestra.

AirmoVOC C₆-C₁₂ presenta también una tabla de análisis de resultados que permite verificar parámetros de control de calidad (tiempo de retención y factor de respuesta) y condiciones para el cálculo de los resultados obtenidos en concentración de cada compuesto analizado. La Figura 7 es un ejemplo de esta tabla.

#29840723 - airmoVOC C6-C12 - Analysis results

Operating conditions
 Sequence: aktest2
 Method: AMB60-A2
 Substance table: VOC-60MIN
 Cycle duration: 3595
 Acquisition duration: 2300
 Sampling date: 04/09/23 18:48

#	Ret. Time	Substance	Peak area	Results	Units	Area offset	Factor	Standard
1	0.0	2-2-DIME-BUTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.100	
2	293.3	2-ME-PENTANE	24118	2.501	ppb(v)	0	1.100	
3	494.9	ME-CYCLOPENTANE	235	0.025	ppb(v)	0	1.100	
4	0.0	BENZENE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.000	
5	612.1	CCI4	7365	6.224	ppb(v)	0	16.000	
6	0.0	CYCLOHEXANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.100	
7	0.0	2-ME-HEXANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.100	
8	708.6	3-ME-HEXANE	310	0.029	ppb(v)	0	1.150	
9	769.9	224-TME-PENTANE	658	0.052	ppb(v)	0	1.100	
10	0.0	N-HEPTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.120	
11	0.0	ME-CYCLOHEXANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.100	
12	0.0	234-TME-PENTANE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.100	
13	0.0	TOLUENE	0	0.000	ppb(v)	0.0	1.050	

Functions
 Base sensitivity: 4001.00
 Molar volume used: 24.45 dm³
 Sample volume : 752.17 ml

Figura 7. Tabla de análisis de resultados.

La etapa siguiente de AirmoVOC C₆-C₁₂ es identificar en el cromatograma cada uno de los compuestos de interés (identificar por especie de compuesto) y registrar las concentraciones obtenidas; es decir, se obtiene la especiación de COVs C₆-C₁₂ en la muestra de aire ambiente (Figura 8). En esta etapa se obtienen resultados preliminares que deben ser analizados y verificados con los controles de calidad y la experiencia del analista de manera tal que la trazabilidad de todo el proceso de análisis de las muestras se traduzca en resultados confiables.

Finalmente, después del registro de resultados sometidos a los procedimientos de control de calidad, con AirmoVOC C₆-C₁₂ se obtienen tendencias diurnas de los compuestos con un muestreo horario de aire ambiente, y se evalúan las concentraciones de COVs C₆-C₁₂ en dicha muestra.

Las concentraciones promedio en el periodo 01 de septiembre a 31 de diciembre de 2023 corresponden a los datos mostrados en las siguientes figuras:

NOMBRE DEL COMPUESTO	NOMBRE DEL COMPUESTO	NOMBRE DEL COMPUESTO
ETANO	1-HEXENO	ESTIRENO
ETILENO	2,4-DIMETIL-PENTANO	O-XILENO
PROPANO	2,3-DIMETIL-PENTANO	N-NONANO
PROPENO	2,2-DIMETIL-BUTANO	I-PROPILBENCENO
I-BUTANO	2-METIL-PENTANO	α -PINENO
N-BUTANO	METIL-CICLOPENTANO	N-PROPILBENCENO
ACETILENO	BENCENO	M-ETILTOLUENO
TRANS-2-BUTENO	CICLOHEXANO	P-ETILTOLUENO
1-BUTENO	2-METIL-HEXANO	1,3,5-TRIMETILBENCENO
CIS-2-BUTENO	3-METIL-HEXANO	O-ETILTOLUENO
CICLOPENTANO	2,2,4-TRIMETIL-PENTANO	β -PINENO
I-PENTANO	N-HEPTANO	1,2,4-TRIMETILBENCENO
N-PENTANO	METIL-CICLOHEXANO	N-DECANO
1,3-BUTADIENO	2,3,4-TRIMETIL-PENTANO	1,2,3-TRIMETILBENCENO
TRANS-2-PENTENO	TOLUENO	M-DIETILBENCENO
1-PENTENO	2-METIL-HEPTANO	P-DIETILBENCENO
CIS-2-PENTENO	3-METIL-HEPTANO	N-UNDECANO
2,3-DIMETIL-BUTANO	N-OCTANO	N-DODECANO
3-METIL-PENTANO	TETRACLOROETENO	
N-HEXANO	ETILBENCENO	
ISOPRENO	M&P-XILENOS	

Sin embargo, considerando que el sistema de monitoreo continuo requirió de una etapa de estabilización mínima de dos meses (septiembre y octubre de 2023) de acuerdo con las especificaciones del fabricante, en el presente reporte se muestran los resultados de los meses de noviembre y diciembre de 2023.

De acuerdo con lo anterior, la etapa siguiente al monitoreo de COVs es el proceso de validación de los datos (Hafner & Penfold, 2018) obtenidos para identificar, corregir y definir la validez de las mediciones.

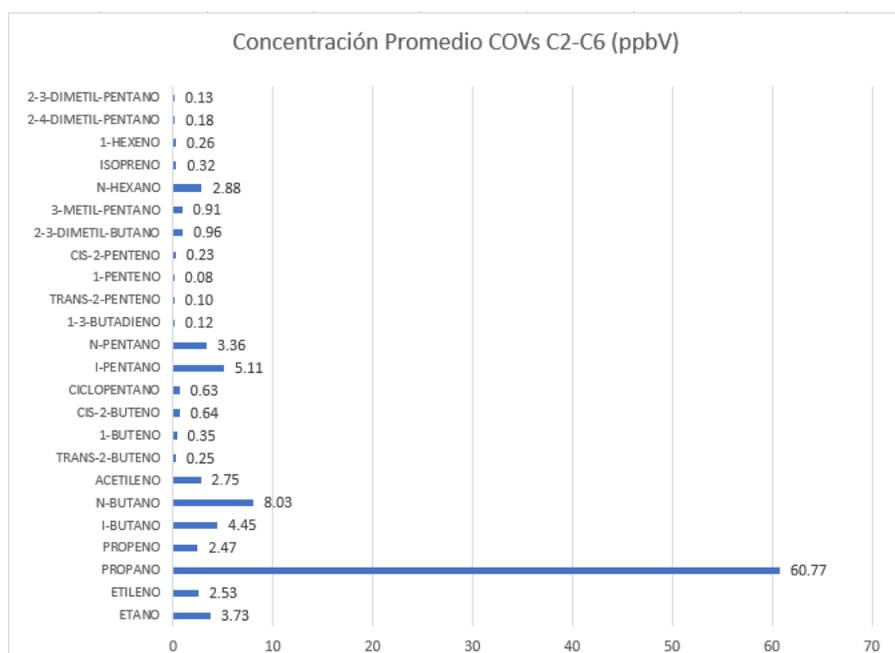


Figura 9. Concentración Promedio de COVs C2-C6 en muestras de aire ambiente (septiembre a diciembre, 2023).

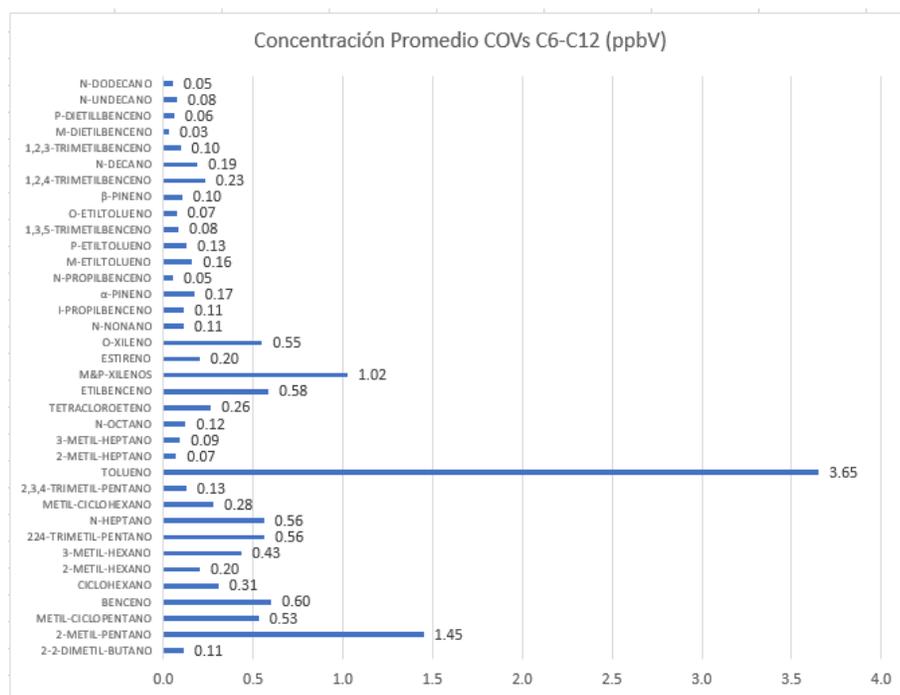


Figura 10. Concentración Promedio de COVs C6-C12 en muestras de aire ambiente (septiembre a diciembre, 2023).

3.1 Validación de Datos

La validación de datos generalmente consta de cuatro niveles:

Nivel 0. Generación de datos y procesamiento inicial de datos, que incluye la identificación de los compuestos, revisión de los datos, identificación de eventos inusuales, informes de resultados, verificaciones de desempeño de los instrumentos, auditorías y comparaciones entre laboratorios.

Nivel I. Comprobación de la identificación de datos típicos y atípicos en comparación con los valores del conjunto de datos. Incluye revisión de datos para detectar lagunas.

Nivel II. Comparación del conjunto de datos actual con datos históricos del mismo sitio para verificar la respuesta a lo largo del tiempo. Este nivel es parte de la interpretación y análisis de datos.

Nivel III. Pruebas paralelas con un conjunto de datos de la misma característica (por ejemplo, región, periodo de tiempo o masa de aire) en diferentes sitios para identificar sesgos. Este nivel es parte de la interpretación y análisis de datos.

Los datos del presente reporte corresponden a las etapas de validación del Nivel 0 en relación a la generación de datos, procesamiento inicial de datos, identificación de compuestos, revisión de datos e identificación de eventos inusuales.

Los datos estadísticos de las tablas siguientes muestran las concentraciones promedio (ppbV) de COVs precursores de ozono del muestreo de aire ambiente en tiempo real que comprende el periodo del 01 de noviembre de 2023 al 31 de diciembre de 2023 (aproximadamente 1463 muestras de aire ambiente).

Tabla 1. Datos estadísticos de concentración de COVs.

	ETANO	ETILENO	PROPANO	PROPENO	i-BUTANO	n-BUTANO	ACETILENO
Mínimo	0.69	0.17	2.74	0.03	0.41	0.64	0.03
Percentil 10	2.15	1.16	24.19	1.01	2.06	3.78	1.51
Promedio	4.30	3.17	72.26	2.86	5.09	9.08	4.12
Mediana	3.90	2.71	60.71	2.49	4.44	7.79	3.54
Percentil 90	7.03	5.88	142.07	5.22	8.85	15.54	7.52
Máximo	28.92	14.75	270.48	9.68	21.28	47.54	16.83
	TRANS-2-BUTENO	1-BUTENO	CIS-2-BUTENO	CICLOPENTANO	i-PENTANO	n-PENTANO	
Mínimo	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.35	
Percentil 10	0.06	0.10	0.04	0.03	2.33	1.73	
Promedio	0.29	0.42	1.30	0.20	5.62	3.76	
Mediana	0.23	0.37	0.25	0.18	5.01	3.37	
Percentil 90	0.61	0.80	4.00	0.39	9.74	6.32	
Máximo	1.58	1.71	5.79	16.05	29.30	17.02	

Datos estadísticos de concentración de COVs (continuación).

	n-HEXANO	ISOPRENO	1-HEXENO	2,4-DIMETIL- PENTANO	2,3-DIMETIL- PENTANO	TOTAL C2-C6
Mínimo	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	5.31
Percentil 10	1.39	0.06	0.02	0.08	0.02	42.57
Promedio	3.02	0.25	0.49	0.21	0.17	119.24
Mediana	2.61	0.17	0.11	0.17	0.08	100.19
Percentil 90	5.34	0.53	1.51	0.38	0.44	227.24
Máximo	23.38	2.44	10.02	1.42	1.46	600.63
	1-3- BUTADIENO	TRANS-2- PENTENO	1-PENTENO	CIS-2-PENTENO	2-3-DIMETIL- BUTANO	3-METIL- PENTANO
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
Percentil 10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.16	0.58
Promedio	0.15	0.12	0.10	0.34	0.94	1.00
Mediana	0.12	0.09	0.07	0.08	0.77	0.93
Percentil 90	0.28	0.23	0.18	0.95	2.00	1.41
Máximo	0.80	0.68	0.79	2.45	9.39	4.43
	2,2-DIMETIL- BUTANO	2-METIL- PENTANO	METIL- CICLOPENTANO	BENCENO	CICLOHEXANO	2-METIL- HEXANO
Mínimo	0.01	0.14	0.01	0.02	0.02	0.01

Datos estadísticos de concentración de COVs (continuación).

Percentil 10	0.05	0.799	0.08	0.29	0.13	0.1
Promedio	0.14	1.59	0.54	0.72	0.33	0.25
Mediana	0.12	1.445	0.47	0.63	0.29	0.21
Percentil 90	0.25	2.58	1.115	1.29	0.58	0.456
Máximo	0.78	4.54	3.18	2.2	1.91	2.63
	3-METIL-HEXANO	2,2,4-TRIMETIL-PENTANO	n-HEPTANO	METIL-CICLOHEXANO	2,3,4-TRIMETIL-PENTANO	TOLUENO
Mínimo	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
Percentil 10	0.17	0.24	0.25	0.09	0.01	0.11
Promedio	0.46	0.65	0.61	0.34	0.11	4.33
Mediana	0.4	0.555	0.52	0.33	0.1	3.47
Percentil 90	0.777	1.225	1.02	0.61	0.21	8.23
Máximo	4.85	2.74	7.57	1.4	0.53	54.88

Tabla 1. Datos estadísticos de concentración de COVs (continuación)

	2-METIL-HEPTANO	3-METIL-HEPTANO	n-OCTANO	TETRACLOROETENO	ETILBENCENO	M&P-XILENOS	ESTIRENO	O-XILENO
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01
Percentil 10	0.02	0.03	0.03	0.03	0.248	0.04	0.06	0.17
Mediana	0.09	0.11	0.14	0.15	0.64	1.13	0.15	0.56

Datos estadísticos de concentración de COVs (continuación).

Mediana	0.08	0.1	0.12	0.07	0.57	0.99	0.13	0.52
Percentil 90	0.18	0.208	0.28	0.39	1.11	2.502	0.25	1.02
Máximo	0.65	0.37	0.85	1.63	2.43	7.87	0.64	2.8
	n-NONANO	i-PROPIL-BENCENO	α-PINENO	n-PROPIL-BENCENO	M-ETILTOLUENO	P-ETILTOLUENO	1,3,5-TRIMETIL-BENCENO	O-ETILTOLUENO
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Percentil 10	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.04	0.02	0.02
Promedio	0.09	0.10	0.15	0.06	0.18	0.13	0.10	0.08
Mediana	0.08	0.085	0.11	0.05	0.16	0.1	0.08	0.06
Percentil 90	0.17	0.19	0.34	0.103	0.34	0.251	0.2	0.16
Máximo	0.48	0.44	0.7	0.68	0.59	0.7	0.79	0.32

	β-PINENO	1,2,4-TRIMETIL-BENCENO	n-DECANO	1,2,3-TRIMETIL-BENCENO	M-DIETIL-BENCENO	P-DIETIL-BENCENO	n-UNDECANO	n-DODECANO	TOTAL C6-C12
Mínimo	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.68
Percentil 10	0.01	0.09	0.08	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	3.89
Promedio	0.08	0.29	0.18	0.08	0.03	0.07	0.07	0.04	15.87
Mediana	0.06	0.27	0.14	0.06	0.03	0.06	0.06	0.03	13.68
Percentil 90	0.16	0.522	0.34	0.17	0.05	0.12	0.13	0.06	29.41
Máximo	0.51	0.96	1.06	0.43	0.18	0.27	0.38	0.44	116.09

Cabe señalar que la base de datos que dio origen a los resultados, se encuentra como archivo anexo de Excel que comprende los muestreos horarios de cada compuesto.

Los COVs que presentan las concentraciones promedio más altas en el periodo de noviembre a diciembre de 2023 son:

Tabla 2. COVs con mayor concentración.

Compuesto	Concentración Promedio (ppbV)
Propano	72.26
i-Butano	5.09
n-Butano	9.08
Acetileno	4.12
i-Pentano	5.62
n-Pentano	3.76
n-Hexano	3.02
Tolueno	4.33

El monitoreo continuo en el mismo periodo y considerando los grupos alcanos y alquenos, aromáticos presentaron el siguiente comportamiento:

Para los COVs de C2 a C6

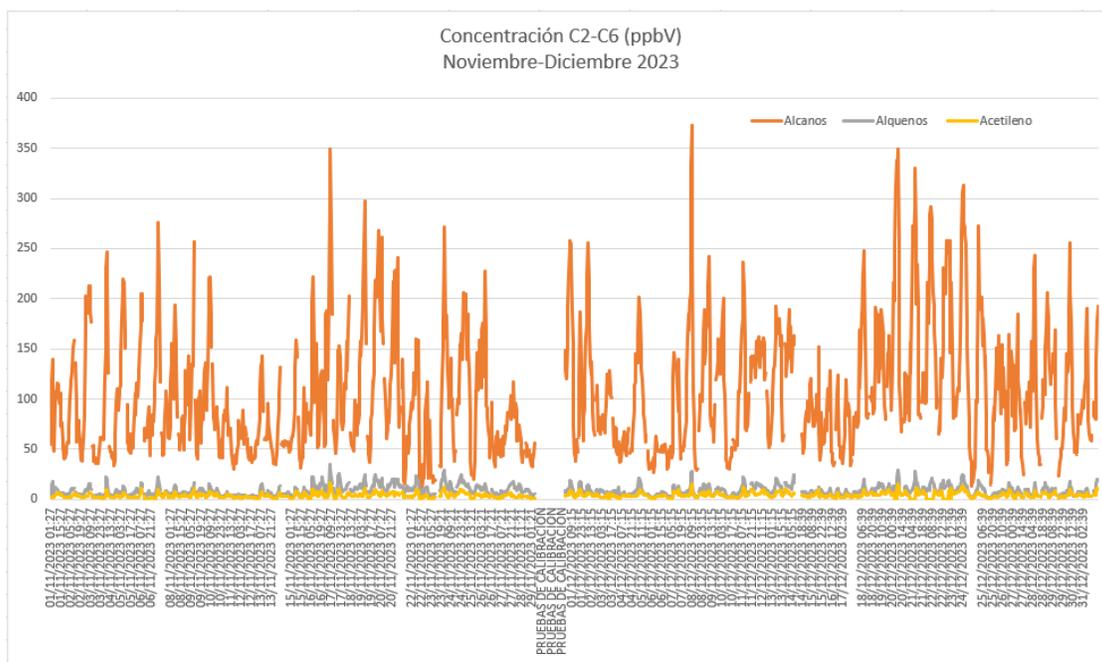


Figura 11. Concentración Horaria de COVs C2-C6 en muestras de aire ambiente.

La Figura 11 muestra la suma de la concentración promedio horaria de alcanos, alquenos y acetileno; en donde cada grupo está constituido por:

Tabla 3. COVs C2-C6 en grupos.

ALCANOS	ALQUENOS	ALQUINO
Etano	Etileno	Acetileno
Propano	Propeno	
I-Butano	Trans-2-Buteno	
n-Butano	1-Buteno	
Ciclopentano	Cis-2-Buteno	
I-Pentano	1,3-Butadieno	
n-Pentano	Trans-2-Penteno	
2,3-Dimetil-Butano	1-Penteno	
3-Metil-Pentano	Cis-2-Penteno	
n-Hexano	Isopreno	
2,4-Dimetil-Pentano	1-Hexeno	
2,3-Dimetil-Pentano		

En relación a las concentraciones promedio horario por grupos (alcanos, alquenos, aromáticos); los COVs ligeros (C₂- C₆) en el grupo de los alcanos presentan mayor concentración durante todo el muestreo diurno en los meses de noviembre y diciembre de 2023 (164.607 ppbV y 11.927 ppbV, respectivamente) entre las 8 y 9 horas en la mañana.

Dentro de los alcanos, que son el grupo más abundante en COVs C₂-C₆; la concentración de propano y butano (72.26 y 9.08 ppbV, respectivamente) aportan la mayor contribución al valor total de la concentración de alcanos. La concentración promedio total de COVs C₂-C₆ fue de 119.24 ppbV.

Para los COVs de C₆ a C₁₂

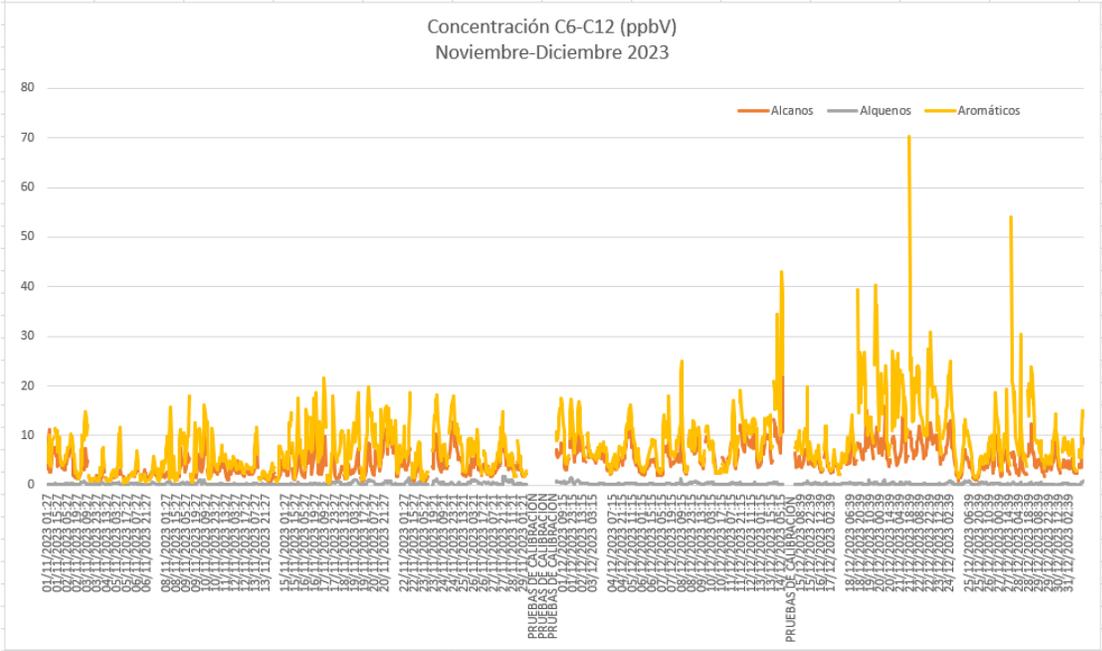


Figura 12. Concentración Horaria de COVs C6-C12 en muestras de aire ambiente.

La Figura 12 muestra la suma de la concentración promedio horaria de COVs C₆-C₁₂ alcanos, alquenos y aromáticos; en donde cada grupo está constituido por:

Tabla 4. COVs C6-C12 en grupos.

ALCANOS	ALQUENOS	AROMÁTICOS
2,2-Dimetil-Butano	Tetracloroetano	Benceno
2-Metil-Pentano	α -Pino	Tolueno
Metil-Ciclopentano	β -Pino	Etilbenceno
Ciclohexano		m- & p-Xilenos
2-Metil-Hexano		Estireno
3-Metil-Hexano		o-Xileno
2,2,4-Trimetil-Pentano		I-Propil-Benceno
n-Heptano		n-Propil-Benceno
Metil-Ciclohexano		m-Etil-Tolueno
2,3,4-Trimetil-Pentano		p-Etil-Tolueno
2-Metil-Heptano		1,2,4-Trimetilbenceno
3-Metil-Heptano		m-Dietilbenceno
n-Octano		p-Dietilbenceno
n-Nonano		
n-Undecano		
n-Dodecano		

El grupo más abundante de COVs C₆ a C₁₂ son los aromáticos que presentan mayor concentración que los alcanos y alquenos en las mediciones diurnas realizadas en noviembre y diciembre de 2023; esto es, 10.386 ppbV en noviembre y 12.792 ppbV en diciembre entre 8 y 9 horas; y en donde el tolueno muestra la concentración promedio horaria mayor (4.33 ppbV). La concentración promedio total de COVs C₆-C₁₂ fue de 15.87 ppbV.

Adicionalmente, se muestra gráficamente el comportamiento de las concentraciones promedio diurnas de COVs por grupos, en los meses de noviembre y diciembre de 2023:

En la Figura 13 se observa un pico de concentración de aromáticos a las 18 horas. Este dato corresponde a la emisión de tolueno de un evento anormal el día 21 de diciembre de 2023 a las 18 horas; en donde el sistema de monitoreo registró una concentración de 54.88 ppbV de tolueno. Debido a que esto es una emisión no común, dicho dato se considera sólo para registrar el comportamiento de las concentraciones de COVs diurnas, pero no para fines estadísticos, en lo que se revisan los datos de NO_y y meteorológicos.

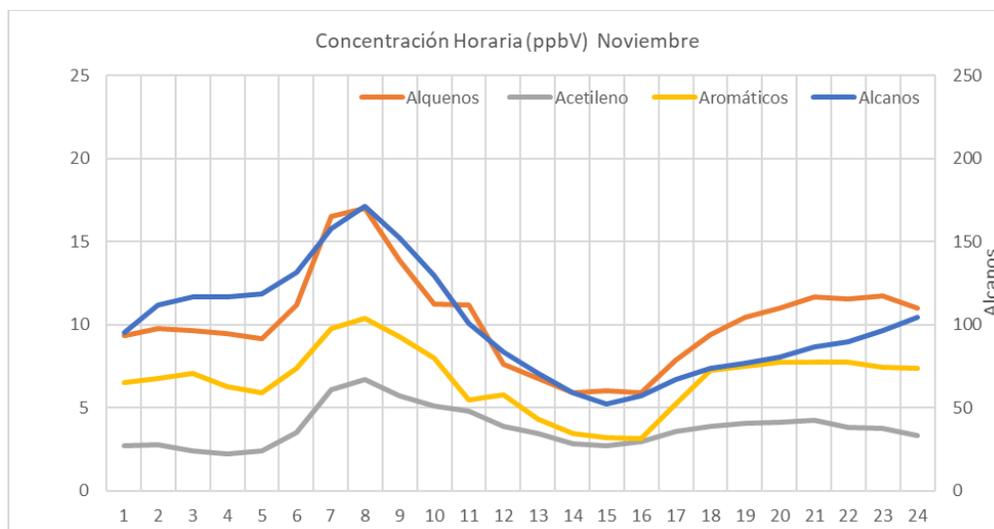


Figura 13. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente (noviembre, 2023).

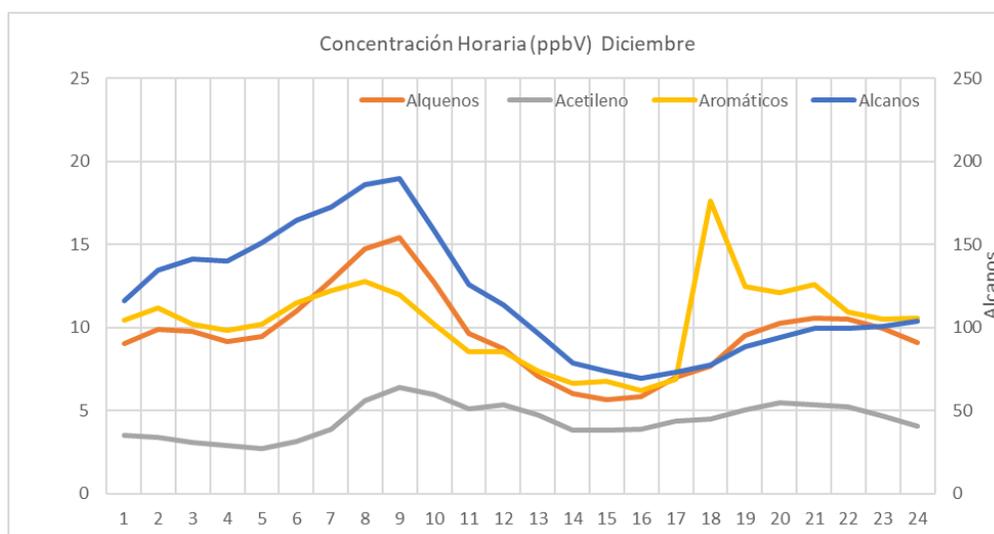


Figura 14. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente (diciembre, 2023).

Eliminando el dato anormal, se observó el mismo patrón de comportamiento en los diferentes grupos: alcanos, alquenos, aromáticos y acetileno. Entre las 6 y 9 horas la concentración de COVs es la más alta por las fuentes de emisión. En el periodo de las 9 y las 13 horas va disminuyendo debido a las reacciones fotoquímicas y la meteorología.

Adicionalmente, se observa un incremento en la concentración de COVs a las 17 horas sin llegar a los picos determinados durante la mañana.

En general el promedio de contribución descendente por familia determinadas fue alcanos > alquenos > aromáticos > acetileno. Los alcanos contribuyeron en un intervalo de concentración de 63-179 ppbV con un promedio de 109 ppbV, lo que representa el 82.4% de los COVs totales, así mismo los alquenos estuvieron presentes en concentraciones de 5.8-15.9 con un promedio de 9.9 ppbV (7.6 % COVT), los aromáticos en el intervalo de 4.7-12.4 y un promedio de concentración de 8.5 ppbV (6.7 % COVT) y el acetileno 2.6-6.2 y un promedio de concentración de 4.1 ppbV (3.3 % COVT). Las tendencias mostradas fueron similares al analizar noviembre y diciembre de manera independiente, aunque cabe mencionar que en diciembre las concentraciones fueron 16 % más altas comparadas con las de noviembre, en los COV totales y alcanos, un 14 % en acetileno y 35 % en aromáticos. Solo los alquenos fueron 6 % más altos en noviembre comparado con diciembre.

En general, el grupo de los alcanos presentan mayor concentración durante todo el muestreo y las tendencias horarias muestran las mayores concentraciones entre las 6 y las 9 horas. Un patrón de distribución diurno similar se observa para los alquenos, aromáticos y acetileno. A partir de las 10 horas se observa una disminución en la concentración de todas las familias debido al consumo de estos compuestos en las reacciones fotoquímicas o por dilución, debido al crecimiento de la capa límite. Posteriormente, a partir de las 17 horas hay un incremento en concentración de todas las familias de COVs.

En la Figura 15 se muestra gráficamente el comportamiento de las concentraciones promedio diurnas de COVs por grupos, del promedio de los meses de noviembre y diciembre de 2023. Las tendencias observadas son muy similares a lo anteriormente descrito.

Por otra parte, otros criterios de validación de datos se basan en los siguientes parámetros:

Especies abundantes. Identificar los hidrocarburos más abundantes típicamente.

En el monitoreo diurno de COVs comprendido entre los meses de noviembre y diciembre se encontró que los compuestos que presentan mayor concentración promedio fueron propano, I-butano, n-butano, I-pentano, n-pentano, n-hexano y tolueno, incluyendo al acetileno y benceno como hidrocarburos target.

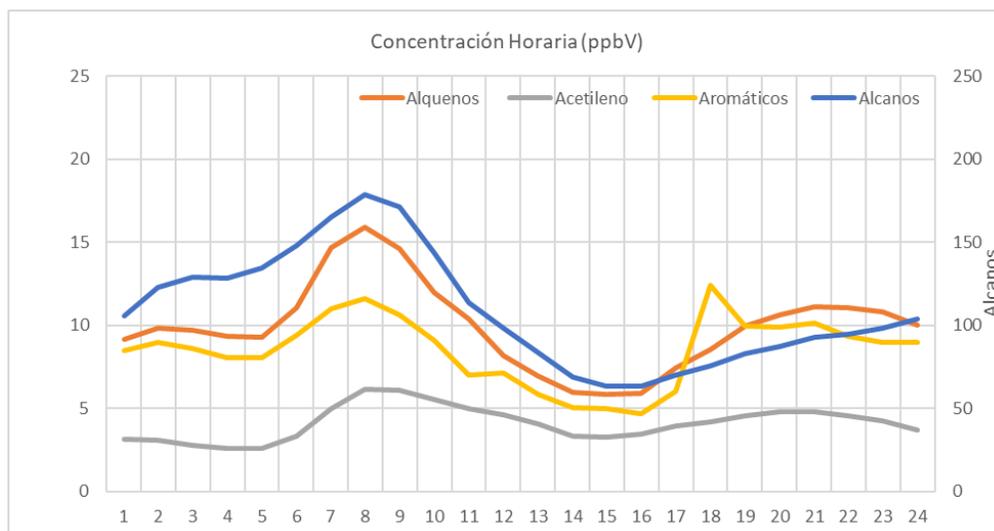


Figura 15. Concentración promedio diurna por familia de COVs en muestras de aire ambiente de noviembre-diciembre.

Variabilidad. Si la medición es un valor atípico de las condiciones ambientales reales.

Se presentó como valor atípico en la concentración de tolueno (54.88 ppbV) el día 21 de diciembre de 2023 a las 18 h; lo cual contribuye al total de los aromáticos que puede observarse en la gráfica 4 como el punto más alto de aromáticos.

Correlaciones entre los compuestos. Adicionalmente, la correlación de concentraciones de compuestos proporciona información de la relación entre los COVs de manera que puede identificarse si existe una posible identificación atípica.

Considerando que a partir de noviembre del año en curso el sistema de monitoreo continuo de COVs presentó mejor estabilidad respecto al análisis de muestras ambientales, los resultados siguientes son en referencia al intervalo 01 de noviembre a 31 de diciembre de 2023.

Un ejemplo de esta correlación es la relación Propano-Butano, cuya fuente de emisión principal es el uso y distribución de gas LP. Para los datos obtenidos entre el 01 de noviembre y el 31 de diciembre de 2023 del monitoreo continuo en tiempo real, se obtuvo la gráfica de dispersión de concentraciones de Propano y Butano:

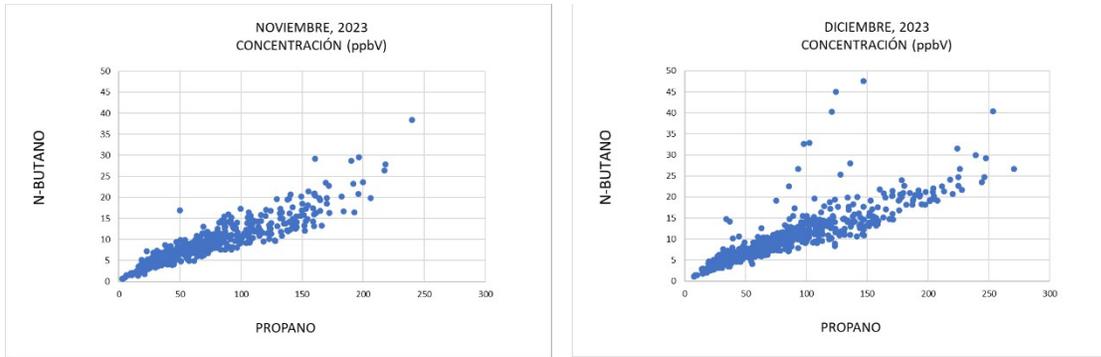


Figura 16. Correlación entre las concentraciones de Propano y Butano durante noviembre y diciembre 2023.

La correlación de los datos de concentración de Benceno-Tolueno normalmente debe mostrar concentraciones de tolueno que superan al benceno. Este patrón de comportamiento se presentó con los datos obtenidos con el muestro continuo en tiempo real de acuerdo como se observa en las gráficas:

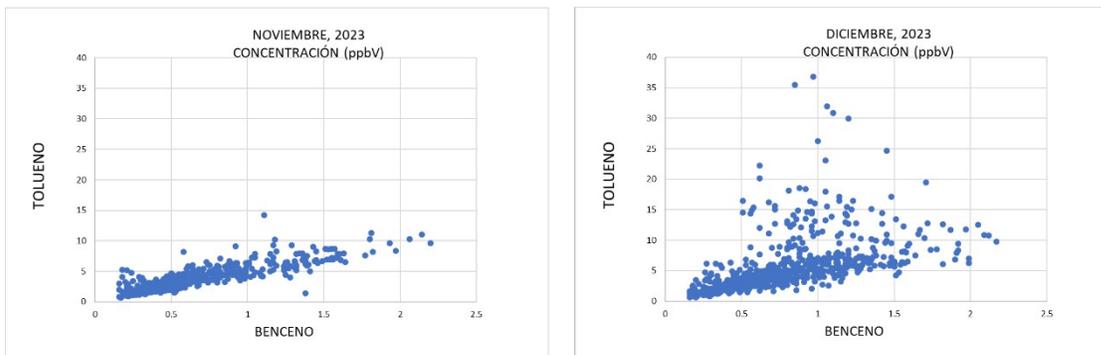


Figura 17. Correlación entre las concentraciones de Benceno y Tolueno durante noviembre y diciembre 2023.

La gráfica de dispersión de las concentraciones de los isómeros de xilenos define muy buena correlación entre ellos, lo cual se traduce en una respuesta adecuada del monitoreo para estas especies con base en la gráfica de dispersión de los datos:

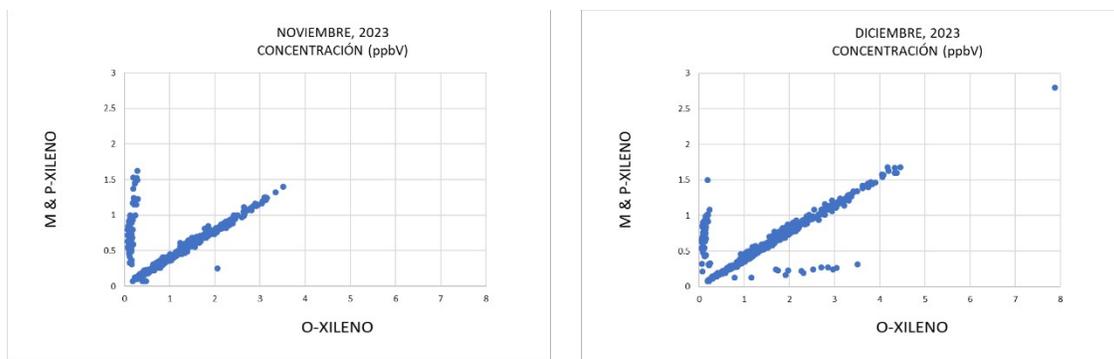


Figura 18. Correlación entre las concentraciones de los isómeros de O-Xileno y M & P-Xileno durante noviembre y diciembre 2023.

Las etapas de análisis y validación de datos del monitoreo de COVs en aire ambiente que corresponden al Nivel 0 en relación a la generación de datos, procesamiento inicial de datos, identificación de compuestos, revisión de datos e identificación de eventos inusuales están comprendidas en el presente reporte.

Cabe señalar que se requieren datos históricos para completar el Nivel 0 de validación de datos (verificaciones de desempeño de los instrumentos, auditorías y comparaciones entre laboratorios) y continuar con los Niveles I, II, y III del proceso de análisis y validación de datos; por lo que se dará seguimiento al monitoreo continuo de COVs en muestras de aire ambiente para la generación de bases de datos en tiempo real de las concentraciones de COVs precursores de ozono.

La evaluación preliminar de los datos indica que el manejo, transporte y uso del gas LP son los compuestos que estuvieron presentes en altas concentraciones, por lo que se debe seguir atendiendo las emisiones provenientes de esta fuente. Por otra parte, en otras épocas, se ha reportado para la Ciudad de México que los alcanos comprendían el 60% de los COVs, los alcanos 5% y los aromáticos el 15%. Adicionalmente, se reportó un 2% de compuestos oxigenados y el 18% de especies no identificadas. En el caso de este estudio se encontró que los alcanos contribuyeron 82.4% de los COVs totales, los alquenos con 7.6 %, los aromáticos con 6.7 % y el acetileno con 3.3 %. Cabe mencionar que no se determinaron los compuestos oxigenados, por lo que la comparación no es directa, pero si se observó una mayor presencia de alcanos y de alquenos, sin embargo, los aromáticos disminuyeron en más del 50%.

Resultados preliminares del modelo WRF-Chem

Se realizaron pruebas preliminares con el modelo Modelo WRF-Chem para estudiar un evento de ozono registrado en el periodo del 17 al 23 de noviembre de 2023. Las mediciones obtenidas en el sitio de monitoreo indican un valor elevado en el máximo de concentración de ozono en superficie para el día 20 de noviembre de 2023.

Para la simulación se consideraron 2 dominios anidados de 15 km y 3 km de resolución especial para capturar la influencia sinóptica y regional. La configuración del modelo consistió en dominios de aproximadamente 100 x 100 celdas y 35 niveles verticales con mayor resolución vertical cerca de la superficie. El primer día de simulación se descartó para el análisis (16 de noviembre). Las emisiones antropogénicas del Inventario Nacional de Emisiones (INEM) 2016 se utilizaron para construir los archivos listos para modelación. Para este ejercicio no se escalan las emisiones. Se comenzó con archivos para temporada de invierno de años anteriores. Asimismo, se utilizaron las emisiones biogénicas del modelo MEGAN. Para este periodo no se consideraron emisiones de quema de biomasa debido a que hubo pocos incendios registrados en este periodo. Se utilizó el mecanismo químico RACM que incluye el esquema basado en volatilidad para la fase partícula (VBS).

Los resultados que se reportan corresponden al dominio de 3 km. Las series de tiempo del modelo se obtuvieron tomando el nodo más cercano a la ubicación del ICAYCC, es decir no se hizo ninguna interpolación. Actualmente se continúa evaluando el desempeño meteorológico del modelo por lo que la interpolación del nodo más cercano puede afectar en la precisión de los resultados.

Para este periodo, el Servicio Meteorológico reporta la llegada de 3 frentes fríos a la República Mexicana (SMN, 2023). El frente frío número 9 (8 – 16 de noviembre) que se desplazó hacia el noroeste llegando hasta Puebla e Hidalgo. El frente frío número 10 (18 de noviembre) de corta duración que ingresó sobre el noreste del país. Por último, el frente frío número 11 (19 – 24 de noviembre) que ingresó sobre el noreste y norte del país ocasionó fuertes lluvias en Puebla.

Los resultados preliminares muestran que el modelo sobreestima la concentración de NO, NO₂ e hidrocarburos (propano), así como del Peroxiacetil Nitrato (PAN) y del nitrógeno reactivo total (NO_y) (Fig. 19). Debido a que en este primer ejercicio no se escalaron las emisiones, se sugiere que esta sobre estimación puede estar relacionada con el uso de emisiones de años anteriores. Sin embargo, se trabaja en calibrar el modelo revisando el perfil de emisión de NO_x, y COVs con base en las mediciones para este periodo en específico.

El modelo reproduce el comportamiento de la concentración de ozono para casi todos los días del periodo considerado. Sin embargo, se sobreestimó el pico del día 19 de noviembre de manera considerable. Debido a que se tuvieron 3 frentes fríos en este periodo de simulación, se sugiere que esta sobreestimación puede ser ocasionada por errores de transporte en el modelo. Actualmente se revisa la configuración para mejorar el desempeño del modelo para este periodo. Adicionalmente, la proporción O₃/NO_y que puede indicar la evolución de los regímenes químicos de sensibilidad a NO_x o VOCs se reproduce de manera razonable para los primeros días de la simulación.

La distribución espacial del cociente O₃/NO_y (Fig. 20) sugiere una contribución de fuentes puntuales al norte de la ZMVM, incluyendo la región de Tula; y también un transporte de otras Zonas Metropolitanas, incluyendo Toluca para los días del 19 al 21 de noviembre. Este resultado se está comparando con las mediciones de NO_y para inferir sobre el posible transporte regional de ozono.

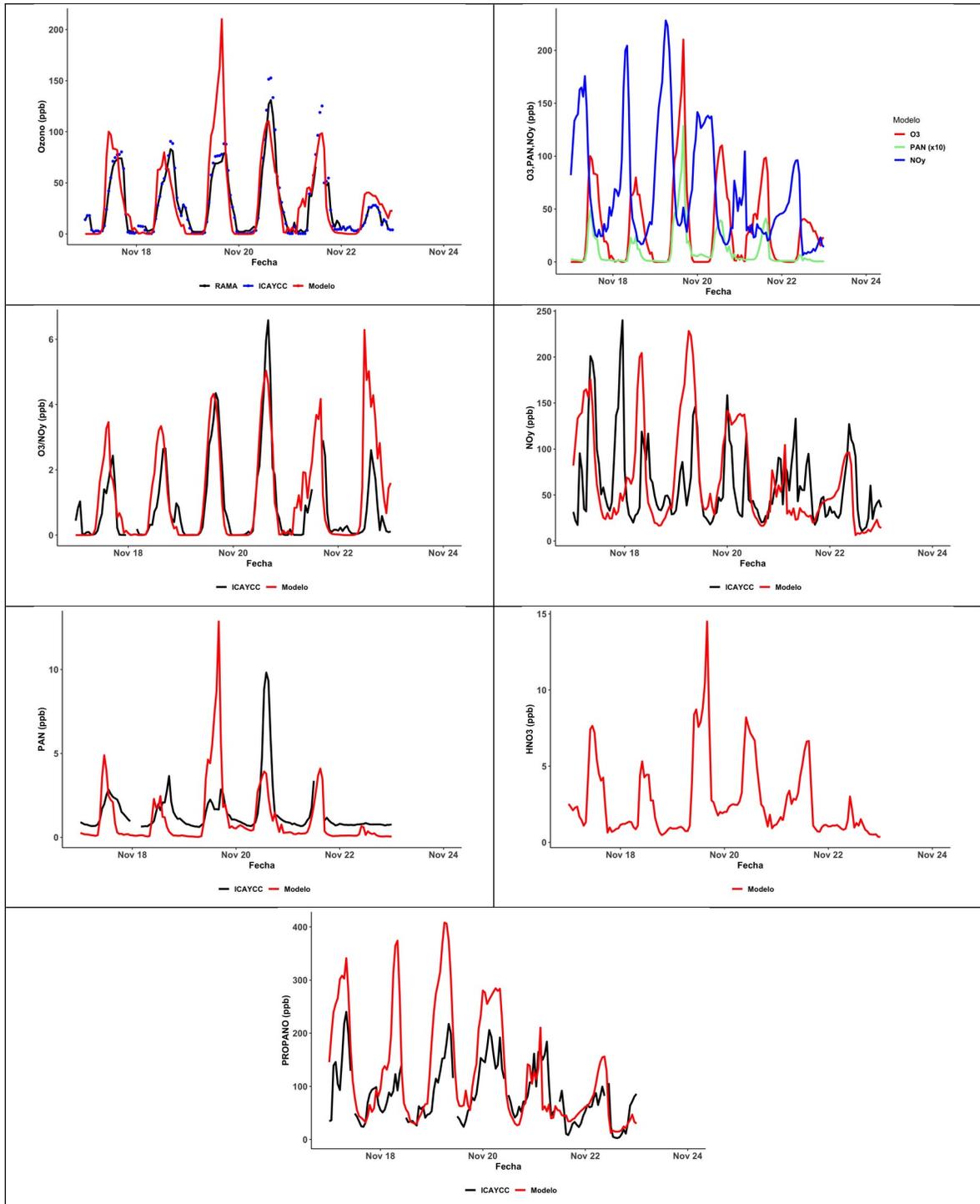


Figura 19. Resultados preliminares con el modelo Modelo WRF-Chem para el periodo del 16 al 23 de noviembre de 2023.

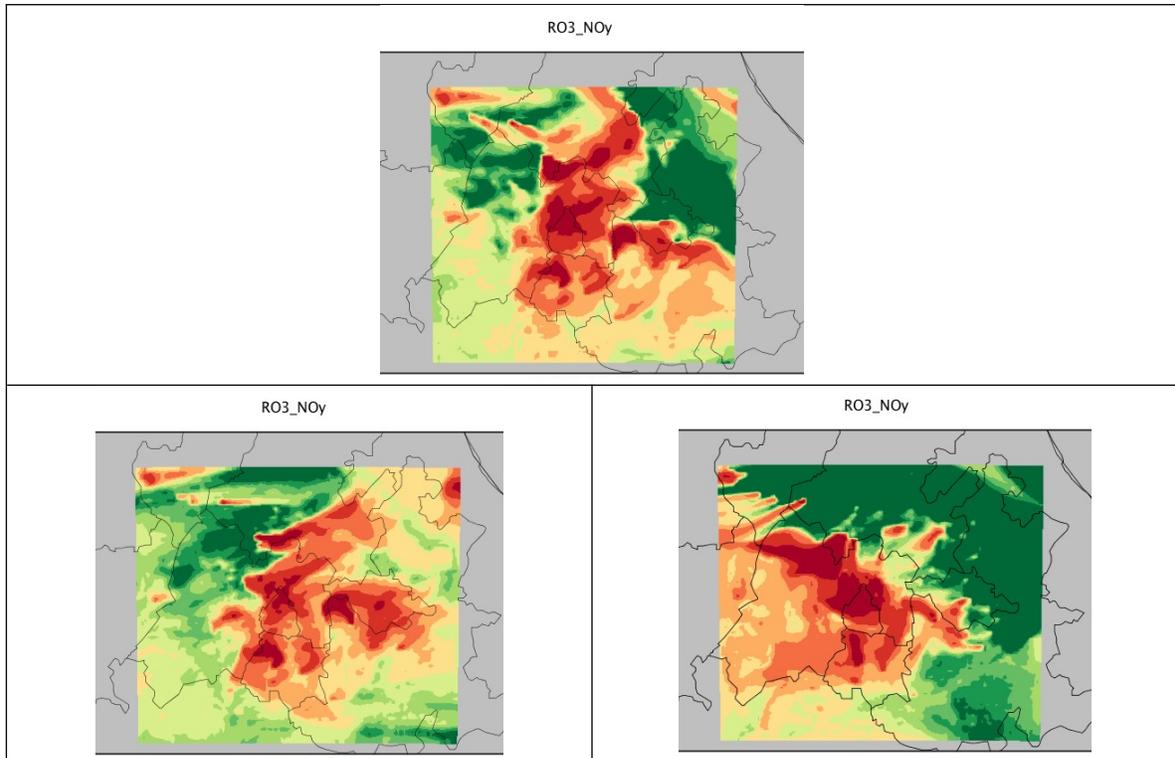


Figura 20. Proporción O_3/NO_y para los días 19, 20 y 21 de noviembre de 2023 a las 14hrs.

4. Referencias.

- Environmental Protection Agency (EPA). 2023a. Basic Information about Air Emissions Monitoring. <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/basic-information-about-air-emissions-monitoring#ambient>. Última consulta: 21/01/2024
- Environmental Protection Agency (EPA). 2023b. Ground-level Ozone Pollution. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#wwh>. Última consulta: 21/01/2024
- Hafner, H. R., & Penfold, B. M. 2018. PAMS Data Validation and Analysis Training Material. Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, January. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/202003/documents/pams_data_analysis_workbook.pdf. Última consulta: 21/01/2024
- Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA). 2023. <https://www.ruoa.unam.mx/pembu/fichas-tecnicas/cca/index.html>. Última consulta: 21/01/2024
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2019. Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2023. Reporte del Clima en México, 13, 11. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Noviembre23.pdf>
- Vega, E., Ramírez, O., Sánchez-Reyna, G., Chow, J.C., Watson, J.G., López-Veneroni, D., Jaimes-Palomera, M. (2022). Volatile Organic Compounds and Carbonyls Pollution in Mexico City and an Urban Industrialized Area of Central Mexico. *Aerosol Air Qual. Res.* 22, 210386. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210386>.

Wang, N., McClure, C., & DeWinter, J. 2023. Technical Assistance Document For Sampling And Analysis Of Ozone Precursors For The Photochemical Assessment Monitoring Stations Program. Revision 3. Prepared for: Office of Air Quality Planning and Standards/Air Quality Assessment Division Research. U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC, EPA-454/R-23-002, May.