



Concentraciones de BTEX atmosféricos en dos sitios urbanos de Campeche

M.G. Vargas-Canto^{1,*}, J.G. Cerón-Bretón², A.A. Espinosa-Guzmán³, R.M. Cerón-Bretón²,
M.P. Uc-Chi², A.E. Castillo-Tejeda¹, L.K. Chavez-Alonzo¹, Vásquez-Rodríguez, M.J.²,
Hernández-López, J.C.²

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Campeche, Campeche, México.

²Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Química, Calle 56 núm. 4, Esquina Avenida Concordia, Col. Benito Juárez, C.P. 24180, Ciudad del Carmen, Campeche, México.

³Universidad Autónoma de Campeche, Instituto de Investigación en Corrosión, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

*Correo de contacto: maria.vc@campeche.tecnm.mx

Resumen

Se determinaron los niveles de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) en aire de dos sitios de Campeche, Campeche durante lluvias 2022. El muestreo fue llevado a cabo de acuerdo al método MTA/MA-030/A92 haciendo pasar aire ambiente a un flujo controlado (1 L min⁻¹) durante 1 hora mediante una bomba de vacío a través de tubos de vidrio empacados con carbón activado, colectando un total de 24 muestras. Las muestras fueron extraídas con 2 mL de CS₂ y analizados por GC-FID. La abundancia relativa en el sitio 1 fue: Benceno (0.979 µg/m³) > etilbenceno (0.349 µg/m³) > xilenos (0.339 µg/m³) > tolueno (0.207 µg/m³) y en el sitio 2 fue : Xilenos (0.348 µg/m³) > benceno (0.336 µg/m³) > etilbenceno (0.228 µg/m³) > tolueno (0.067 µg/m³). Las razones tolueno/benceno y xileno/etilbenceno revelaron que la contribución relativa de fuentes móviles y emisiones frescas de tipo local fue importante en ambos sitios de muestreo. El análisis estadístico bi-variado y multivariado mostró que los BTEX fueron originados por fuentes en común en los sitios de estudio.

Palabras claves: BTEX, hidrocarburos aromáticos, calidad del aire, contaminación atmosférica, Campeche.

Abstract

BTEX concentrations (benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes) were measured in air in two sites of Campeche, Campeche during the rainy season, 2022. Sampling was carried out base on the MTA/MA-030/A92 method, passing air at a controlled flow (1 L min⁻¹) using a vacuum pump trough glass tubes packed with active carbon, collecting a total of 24 samples. Samples were extracted with 2 mL of CS₂ and then analyzed by GC-FID. Relative abundance of BTEX in site 1 was: Benzene (0.979 µg/m³) > ethylbenzene (0.349 µg/m³) > xylenes (0.339 µg/m³) > toluene (0.207 µg/m³) and for Site 2 was: Xylenes (0.348 µg/m³) > benzene (0.336 µg/m³) > ethylbenzene (0.228 µg/m³) > toluene (0.067 µg/m³). Toluene/benzene and ethylbenzene/xylenes ratios revealed that the relative contribution of mobile sources and fresh-local emissions were important. Bi-variate y multi-variate statistical analysis showed that all measured BTEX were originated from common sources in the studied sites.

Keywords: BTEX, aromatic hydrocarbons, air quality, atmospheric pollution, Campeche



1. Introducción

La calidad del aire en áreas urbanas depende de las emisiones de contaminantes, condiciones meteorológicas y geográficas, la radiación solar y parámetros de depositación y dispersión [1]. La emisión de contaminantes atmosféricos es el resultado de actividades antropogénicas tales como industrias, tránsito vehicular, quema de biomasa, fuentes de área, etc. Los denominados Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) son los contaminantes gaseosos más abundantes en las áreas urbanas y se caracterizan por tener múltiples y variadas fuentes de emisión (Figura 1). Dentro de la familia de los COVs existe un grupo de compuestos llamados “BTEX”, que son derivados alquilo del benceno, los cuales incluyen al tolueno, etilbenceno, 1,2,4-trimetil-benceno y xilenos (orto-, meta- y para- xilenos) [2]. Los BTEX son hidrocarburos aromáticos, es decir son compuestos orgánicos cíclicos conjugados, son reconocidos como importantes precursores fotoquímicos del ozono troposférico [3], comúnmente se asocian con las emisiones vehiculares en áreas urbanas y a menudo son usados como indicadores de daños a la salud [4].



Fig. 1. Fuentes de emisión a la atmósfera de los BTEX [5] (Elaboración propia).

Dentro de los efectos a la salud que pueden resultar de la inhalación de estos compuestos se incluyen: a) Efectos carcinogénicos debido a la inhalación de benceno y b) Efectos no carcinogénicos (potencial de desarrollar enfermedades respiratorias y cardiovasculares) por exposición a BTEX. Por otra parte, los COVs son especies reactivas que rompen el equilibrio natural de la generación-destrucción del ozono troposférico, por lo que las concentraciones de estos contaminantes son frecuentemente altas en el entorno urbano ya que, desde el momento en que éstos entran en contacto con la atmósfera son evaporados en el aire, incluso aquellos que tienen un elevado peso molecular pueden ser adsorbidos por partículas atmosféricas [6].



El benceno puede causar alteraciones cromosómicas en linfocitos y células de la médula ósea, citopenia, que es una disminución de varios elementos celulares de la sangre circulante que se manifiesta como anemia, leucopenia o trombocitopenia en humanos, leucemia no linfocítica, leucemia mielógena aguda; el tolueno ha sido asociado con irritación del tracto respiratorio, lesiones pulmonares, edema alveolar, fibrosis y necrosis intersticiales, alteraciones al ritmo cardiaco y síntomas neurotóxicos; mientras que el etilbenceno y los xilenos han sido asociados con Irritación respiratoria, alteración del rendimiento de las funciones pulmonares, irritación de nariz y garganta, congestión pulmonar, hemorragia e inflamación pulmonar [7,8].

Actualmente en México no existe una normatividad que regule los límites máximos permisibles de BTEX en aire ambiente y no se realizan mediciones continuas de sus concentraciones en las redes de monitoreo pertenecientes al Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA), salvo en algunas estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de la Ciudad de México. Por lo anterior se requiere hacer mediciones de estos compuestos en la atmósfera de áreas urbanas y conocer su distribución espacial y temporal. El presente trabajo tiene por objeto conocer los niveles atmosféricos de BTEX en dos sitios en el estado de Campeche, conocer su relación con la meteorología prevaleciente, así como el riesgo a la salud que representan estos compuestos para la salud de la población en el sitio de estudio.

2. Descripción del área de estudio

El muestreo en el sitio 1 se realizó en el edificio sede del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) (19.843044 N, -90.536749 W) en el centro histórico de San Francisco de Campeche. El segundo sitio estuvo ubicado en el Instituto Tecnológico de Campeche, campus Lerma (19.79348 N, -90.61634W). El muestreo se llevó a cabo en la Época de Lluvias (Junio-Julio) del año 2022. La figura 2 muestra la ubicación de ambos sitios en San Francisco de Campeche, Campeche.

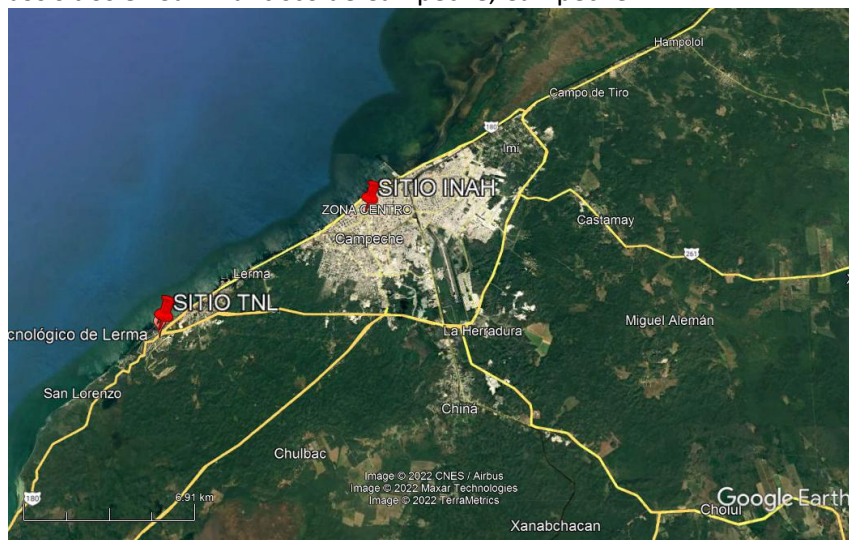


Fig. 2. Localización de los dos sitios de muestreo: Instituto Tecnológico de Lerma (TNL) y Sitio Centro dentro de las instalaciones del Instituto Nacional de Arqueología e Historia (INAH).



3. Metodología experimental

3.1 Muestreo de BTEX en aire ambiente

El muestreo de BTEX en aire ambiente se llevó a cabo con base al método MTA/MA-030/A92 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene de España [9], haciendo pasar aire a un flujo controlado (1 L min^{-1}) mediante una bomba de vacío tipo portátil SKC, a través de tubos de vidrio de la marca SKC modelo 226-01 Anasorb CSC con longitud 70 mm; diámetro interior 4.0 mm; 6 mm de diámetro exterior (embalados en dos secciones con 50 mg y 100 mg de carbón activado). Se colectaron un total de 24 muestras por un periodo total de 8 días, considerando tres muestreos diarios con duración de 1 hora: B1 (de 07:00 a 8:30 h), B2 (de 14:00 a 15:30 h) y B3 (de 18:00 a 19:30 h).

3.2 Análisis cromatográfico para la determinación de BTEX en aire ambiente

Se realizó el análisis químico de las muestras por medio de cromatografía de gases con detector de ionización de flama de acuerdo con la metodología establecida por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene de España (Métodos de Toma de Muestra y Análisis MTA/MA-030/A92). Para la determinación de los BTEX se realizó la extracción de cada una de las muestras con 2 ml de disulfuro de carbono (CS_2) en viales color ámbar de tapa roscada con septa para 2 ml y se agitó el vial durante un periodo aproximado de 5 minutos para asegurar que la extracción fuese máxima, se llevó a refrigeración por 24 horas hasta su posterior análisis. Una vez realizada la extracción, se procedió a hacer el análisis cromatográfico usando un equipo TRACE GC Ultra Gas Chromatographs marca Thermoscientific en modo splitless con detector de ionización de flama. La columna capilar empleada fue de 30 m x 0.32 mm ID, tipo metil de sílica fundida con un espesor de película de 0.5 μm . Se tomó 1 μL de la muestra del vial y 1 μL de aire (para asegurar que la muestra inyectada entre directamente a la columna), posteriormente se inyectó en el equipo de cromatografía previamente acondicionado para el análisis. Se prepararon curvas de calibración a diferentes concentraciones para cada uno de los BTEX medidos (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) a partir de soluciones estándar, de las cuales se obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0.99.

3.3 Razones de BTEX

Se obtuvo el cociente de las concentraciones de tolueno entre benceno (T/B) y de xileno y etilbenceno (X/E), con el propósito de identificar el probable origen de los BTEX, es decir, si las emisiones fueron originadas a partir de fuentes móviles o de área (razón T/B) y si las masas de aire conteniendo a estos compuestos fueron de tipo fresca (emisiones locales recientes) o añejas (razón X/E).

Razón Tolueno/Benceno: Esta razón ha sido comúnmente usada como un indicador de emisiones de tráfico vehicular. Ambos compuestos son constituyentes de la gasolina y son emitidos a la atmosfera a partir de escapes de vehículos a motor. El contenido de tolueno en la gasolina es de 3 a 4 veces más alto que el contenido de benceno [10]. Valores menores a 2-3 son característicos de emisiones vehiculares y han sido reportados en este rango para muchas áreas urbanas alrededor del mundo [11, 12]; mientras que valores mayores a 3 pueden indicar que los niveles de BTEX pudieron estar asociados con otras fuentes diferentes a las vehiculares, tales como instalaciones industriales y fuentes de área (emisiones evaporativas, talleres de pintura automotriz, procesos de cocción de alimentos, talleres de serigrafía, tintorerías, entre otros).

Razón Xileno/Etilbenceno: Esta razón es comúnmente usada como un indicador de la edad fotoquímica de las masas de aire en un sitio dado [13, 14] y se relaciona con el tiempo de vida atmosférico de estos contaminantes en el aire. Valores altos indican masas de aire añejas, mientras que valores bajos indican



que las masas de aire son frescas (emisiones recientes). Kuntasal et al. [15] usaron un valor de 3.8 para esta razón. Emisiones frescas de gasolina proporcionan valores entre 3.8 y 4.4 para esta razón.

3.4 Análisis de rosas de vientos

Se construyeron diagramas de rosas de los vientos para determinar la distribución de la dirección y la rapidez del viento en los sitios de estudio, usando el software WRPLOT (Wind Rose Plots for Meteorological Data).

3.5 Análisis Estadístico

Se usó la correlación de Spearman para identificar las relaciones bi-variadas entre los contaminantes medidos y variables meteorológicas. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para explicar la variación y descubrir la estructura del conjunto de datos y poder determinar las relaciones multivariadas que permitan inferir las fuentes probables de emisión en base a trazadores. Este método ha sido ampliamente utilizado en estudios ambientales para identificar patrones en los datos [16]. Los resultados de ACP generalmente son representados en bi-plots o tablas de carga de factores que revelan correlaciones entre las observaciones. La información revelada por ACP es útil para identificar las relaciones multivariadas, o si un contaminante es secundario o primario. Todos los análisis estadísticos se realizaron usando el software XLSTAT.

4. Resultados experimentales

4.1 Concentración, variación diurna de BTEX en ambos sitios de muestreo durante la temporada de lluvias 2022

Se midieron las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) en dos sitios de muestreo durante la temporada de lluvias 2022: sitio centro (INAH) y Sitio del Tecnológico Nacional Campus Lerma (TNL). En las tablas 1 y 2 se muestran las concentraciones obtenidas en ambos sitios de muestreo y en las Figuras 3 y 4 se pueden observar los boxplot de las concentraciones de BTEX en ambos sitios de muestreo. Se puede observar que durante la temporada de lluvias 2022, xilenos y benceno fueron los compuestos con niveles más altos en ambos sitios. Esto refleja la influencia de las emisiones provenientes de tráfico vehicular que pudo haber contribuido a los niveles de benceno en estos sitios. Benceno y Tolueno fueron mayores en el sitio INAH, el cual se encuentra expuesto a mayor tráfico vehicular por lo que estas emisiones pudieron haber contribuido a los niveles de estos compuestos en este sitio, dado que tolueno y benceno son constituyentes de la gasolina.

En la Figura 5 puede observarse que para el sitio del centro (INAH) durante la temporada de lluvias 2022, benceno tuvo mayores concentraciones promedio durante la mañana y medio día, mientras que los menores valores promedio los presentó durante el muestreo de la tarde: B1 ($1.120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 ($1.016 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > B3 ($0.801 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto puede explicarse debido a que estos periodos coinciden con los picos de tráfico vehicular cuando la población se transporta a sus trabajos durante la mañana y a sus hogares a la hora de la comida al medio día, además de que este sitio se ubica en el centro de la ciudad donde se localizan oficinas de gobierno, bancos, etc. que hacen que la afluencia vehicular sea mayor con respecto al sitio TNL. Además también de la presencia de estaciones de servicio de distribución de gasolina que pudieron haber contribuido a los niveles de benceno en el este sitio (INAH). Tolueno tuvo el siguiente comportamiento diurno: B1 ($0.288 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > B3 ($0.221 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 ($0.114 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Etilbenceno presentó los mayores valores de concentración durante la tarde (B3) con el siguiente comportamiento diurno:



B3(0.243 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B1(0.232 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 (0.223 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Xilenos tuvieron el siguiente comportamiento a lo largo del día: B1 (0.356 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B3 (0.345 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 (0.316 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tecnológico Nacional de Lerma, Temporada de lluvias 2022											
Benceno $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Tolueno $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Etilbenceno $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Xileno $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
0.0647	0.3828	0.6189	0.0192	0.0585	0.0616	0.2213	0.2196	0.1792	0.3048	0.3586	0.3594
0.1938	0.0906	0.3633	0.0409	0.0480	0.2940	0.1989	0.2188	0.1523	0.3272	0.2985	0.4122
0.1258	0.0358	0.4141	0.0409	0.0959	0.1137	0.2415	0.3923	0.1502	0.3352	0.9034	0.2684
0.2130	0.0616	0.0487	0.0192	0.0480	0.0874	0.3239	0.2150	0.1814	0.3591	0.3062	0.2990
0.2130	0.0469	0.0089	0.0461	0.0380	0.0586	0.1395	0.2204	0.3296	0.2580	0.2893	0.3474
0.2577	0.3828	0.7869	0.0409	0.0480	0.1137	0.2527	0.1524	0.2538	0.2784	0.2724	0.2696
0.4230	1.1271	0.4983	0.0674	0.0209	0.1229	0.2035	0.1974	0.2450	0.3159	0.2829	0.6590
0.2130	0.9345	0.5738	0.0528	0.0269	0.0578	0.1847	0.2567	0.3382	0.2548	0.2627	0.3294

B1: Muestreo de la mañana, B2: Muestreo del medio día; B3: Muestreo de la tarde

Tabla 1. Concentraciones de BTEX obtenidas en el sitio del Tecnológico Nacional de Lerma (TNL) durante la temporada de lluvias 2022.

La Figura 6 muestra el comportamiento diurno de las concentraciones de BTEX en el sitio del Tecnológico Nacional de Lerma (TNL) durante la temporada de lluvias 2022. Benceno tuvo mayores concentraciones promedio durante la tarde, mientras que los menores valores promedio los presentó durante el muestreo de la mañana: B3 (0.414 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 (0.383 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B1 (0.213 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Tolueno el mismo comportamiento diurno: B3 (0.114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B2 (0.048 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B1 (0.041 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Etilbenceno presentó los mayores valores de concentración durante el mediodía (B2) con el siguiente comportamiento diurno: B2 (0.234 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B3 (0.229 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B1 (0.221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Xilenos tuvieron el siguiente comportamiento a lo largo del día: B2 (0.372 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B3 (0.368 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > B1 (0.304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A pesar de las diferencias entre las concentraciones de BTEX a lo largo del día, al aplicar la prueba de Friedman se encontró que estas diferencias no fueron significativas a un nivel de significancia de alfa=0.05 para todos los BTEX en ambos sitios de muestreo, con excepción de tolueno en el sitio TNL.

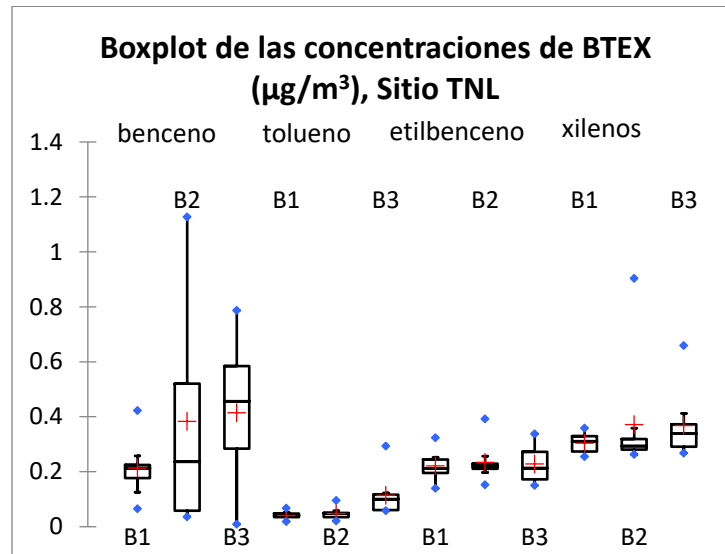


Fig. 6. Box plot de las concentraciones de BTEX en el sitio INAH durante la temporada de lluvias 2022

Sitio Centro (INAH), Temporada de lluvias 2022											
Benceno µg/m³			Tolueno µg/m³			Etilbenceno µg/m³			Xileno µg/m³		
B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
2.0881	0.9736	1.2646	0.6496	0.1729	0.3493	0.3455	0.2191	0.2444	0.5015	0.3320	0.3496
1.3013	1.3220	1.1497	0.3185	0.1301	0.1971	0.1904	0.2934	0.2024	0.2734	0.3580	0.3300
1.0185	1.2736	0.7890	0.1102	0.1136	0.2397	0.2195	0.1831	0.1906	0.3121	0.2787	0.3200
0.7520	1.0021	0.9649	0.2199	0.1604	0.4079	0.1879	0.1559	0.3293	0.2951	0.2852	0.4816
1.1861	1.5697	0.4251	0.2421	0.1136	0.0691	0.1811	0.1607	0.1990	0.2786	0.2924	0.2626
1.1275	0.5323	0.6013	0.3228	0.0922	0.0643	0.2405	0.3273	0.1235	0.3236	0.3263	0.2786
1.1405	0.6103	0.8008	0.1916	0.0943	0.0295	0.3007	0.1736	0.1524	0.5446	0.2845	0.3702
0.3497	0.8481	0.4108	0.2516	0.0320	0.4075	0.1885	0.2695	0.5023	0.3186	0.3690	0.3700

B1: Muestreo de la mañana, B2: Muestreo del medio día; B3: Muestreo de la tarde

Tabla 2. Concentraciones de BTEX obtenidas en el sitio del Tecnológico Nacional de Lerma (TNL) durante la temporada de lluvias 2022.

De acuerdo a la Tabla 3, las concentraciones promedio de Benceno en el sitio de INAH se encuentra dentro del rango reportado para Bari, Italia [17]. Los valores de benceno en este sitio son menores que los reportados por Marc et al. [18] en Polonia y se encuentran también dentro del rango de valores reportados por Menchaca y colaboradores en Monterrey. Las concentraciones promedio de Tolueno en ambos sitios de muestreo se encuentran por debajo de los reportados en ciudades como Valencia, Bari, Beijing, Polonia, CDMX y Monterrey. Etilbenceno y xilenos en ambos sitios de muestreo se encuentran dentro del rango de valores reportado para Polonia [18] y para Monterrey [19].

	Benceno (µg/m³)	Tolueno (µg/m³)	Etilbenceno (µg/m³)	Xileno (µg/m³)
Presente estudio Sitio INAH	0.979	0.207	0.349	0.339



Presente estudio sitio TNL	0.336	0.067	0.228	0.348
Esplugues et al., 2010 (Valencia, España) [20]	1.2	6.8	0.9	1.4
Caselli et al., 2002 (Bari, Italia) [17]	0.8-9	0.9-15.5	0.2-2.7	1.1-13.9
Zhang et al., 2012 (Beijin, China) [21]	2.1-9.2	5.9-14.5	2.3-4.4	1.7-3.5
Marć et al., 2014 (Polonia) [18]	0.49-0.82	0.74-1.39	0.13-0.42	0.43-1.27
Bravo et al., 2002 (Ciudad de México) [22]	1.66-3.67	7.5-17.63		
Menchaca et al., 2015 (Monterrey, México) [19]	0.3-5.1	1.8-4.5	0.1-0.4	0.2-2.2

Tabla 3. Comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con otros lugares en México y alrededor del mundo.

4.2 Análisis de Rosas de viento para ambos sitios de muestreo

La Figura 7 muestra rosas de vientos representativas de las condiciones de viento observadas en el sitio INAH, mientras que la Figura 8 muestra el análisis de las rosas de viento para el sitio TNL. Como puede observarse en el sitio de INAH, los vientos dominantes soplaron desde el NE y SE con vientos entre 1 -7 m/s. Por otro lado, los vientos en el sitio TNL soplaron predominantemente desde el E y SE con velocidades de 1-7 m/s.

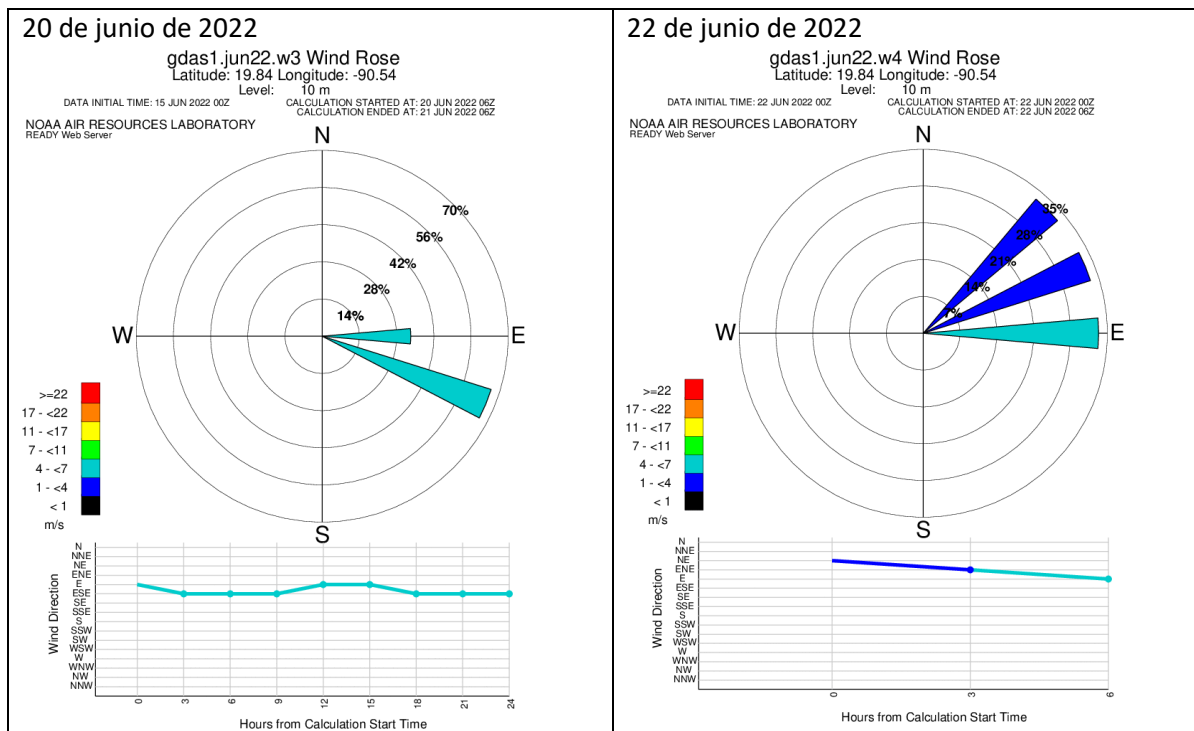


Figura 7. Rosas de viento representativas para el sitio INAH durante el periodo de estudio.

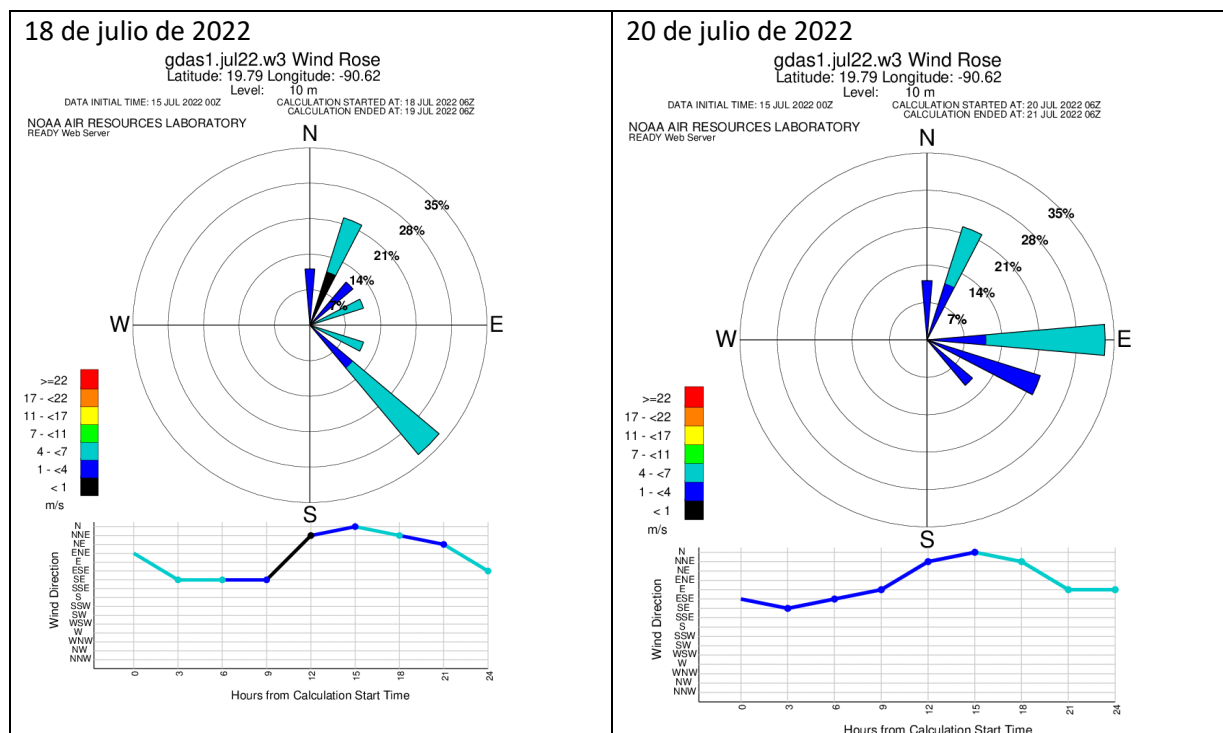


Figura 8. Rosas de viento representativas para el sitio TNL durante el periodo de estudio.

4.3 Razones BTEX

El análisis de las relaciones BTEX se ha utilizado por varios autores para estimar las fuentes de contaminación y la reactividad fotoquímica del aire y se basa en el supuesto de que los BTEX tienen diferentes tasas de degradación en el aire [23].

En las Tablas 4 y 5 se muestran las relaciones de tolueno-benceno (T/B) y xileno-etilbenceno (X/E) para ambos sitios de muestreo y para cada periodo de muestreo (B1, B2 y B3) durante la temporada de lluvias 2022. En las zonas urbanas, los gases de escape de gasolina son una fuente importante de BTEX en la atmósfera. El tolueno y el benceno son comúnmente componentes de la gasolina, sin embargo el tolueno tiene otras fuentes de origen, como la evaporación de solventes, las emisiones evaporativas de superficies recubiertas, estaciones de servicio y almacenamiento de combustible, así como las fuentes industriales y fuentes de área [24-26]. Los valores bajos de esta relación indican que la contribución de las emisiones derivadas del tráfico vehicular son importantes en el sitio de estudio, mientras que los valores altos indican una fuerte contribución de fuentes más allá del tráfico vehicular a los niveles de BTEX [27, 28]. Valores entre 1-2 y menores han sido reportados para la razón T/B en zonas urbanas en donde la contribución de emisiones vehiculares a los niveles de BTEX es importante [24]. Los valores de esta razón en ambos sitios de muestreo se encuentran en este rango (menores a 2), por lo que se puede decir que la contribución relativa de fuentes móviles a los niveles de BTEX fue importante en ambos sitios de estudio y que la contribución de fuentes de área e industriales no fue importante.

La relación X/E sirve para investigar la edad fotoquímica de las masas de aire, la diferencia en la tasa de oxidación entre xileno y etilbenceno es aún mayor hace de esta razón una herramienta buena para determinar la edad fotoquímica de las masas de aire [29]. Los valores bajos de esta relación indican que los BTEX permanecen en la atmósfera debido a una reactividad más rápida del xileno con el radical OH



(masas de aire envejecidas). Por el contrario, los valores altos de esta razón indican que las emisiones frescas influyeron en los BTEX en el sitio del estudio. Los valores de la relación X/E inferior a 3 indican que los BTEX probablemente fueron transportados desde fuentes distantes. Como se puede observar en la Tablas 4 y 5, las relaciones X/E encontradas en este estudio fueron inferiores a 3, lo que indica que los BTEX medidos en ambos sitios de estudio durante la temporada de lluvias 2022 podría ser el resultado del transporte de masas de aire desde fuentes localizadas en ubicaciones cercanas.

Tecnológico Nacional de Lerma, Temporada de lluvias 2022					
T/B			X/E		
B1	B2	B3	B1	B2	B3
0.2961	0.1528	0.0995	1.3777	1.6326	2.0055
0.2113	0.5300	0.8093	1.6447	1.3645	2.7066
0.3255	2.6789	0.2746	1.3878	2.3025	1.7872
0.0902	0.7799	1.7943	1.1087	1.4243	1.6484
0.2165	0.8107	6.6169	1.8502	1.3125	1.0541
0.1588	0.1255	0.1445	1.1015	1.7872	1.0625
0.1592	0.0185	0.2466	1.5525	1.4331	2.6896
0.2481	0.0288	0.1008	1.3794	1.0234	0.9740
0.2132	0.6406	1.2608	1.4253	1.5350	1.7410

Tabla 4. Razones de BTEX para el sitio TNL durante la temporada de lluvias 2022

Sitio Centro (INAH), Temporada de lluvias 2022					
T/B			X/E		
B1	B2	B3	B1	B2	B3
0.3111	0.1776	0.2762	1.4513	1.5155	1.4306
0.2448	0.0984	0.1714	1.4364	1.2203	1.6304
0.1082	0.0892	0.3038	1.4222	1.5221	1.6791
0.2924	0.1600	0.4227	1.5710	1.8297	1.4623
0.2041	0.0724	0.1626	1.5379	1.8195	1.3196
0.2863	0.1733	0.1069	1.3456	0.9969	2.2554
0.1680	0.1545	0.0368	1.8113	1.6387	2.4286
0.7194	0.0378	0.9921	1.6905	1.3693	0.7365
0.2918	0.1204	0.3091	1.5333	1.4890	1.6178

Tabla 5. Razones de BTEX para el sitio INAH durante la temporada de lluvias 2022

4.4 Análisis Estadístico

Se aplicaron pruebas de normalidad a los datos de BTEX encontrados en ambos sitios de estudio, encontrándose que su comportamiento se desviaba de la normalidad, por lo que se decidió hacer un análisis estadístico no paramétrico. Las Tablas 5, 6 y 7 muestran la matriz de correlación de Spearman para las concentraciones de BTEX tomando en cuenta las concentraciones obtenidas en ambos sitios de estudio durante la temporada de lluvias 2022, para el muestreo de la mañana (B1), medio día (B2) y tarde (B3), respectivamente. Como puede observarse en la Tabla 5, Etilbenceno y xileno durante el periodo de



muestreo de la mañana (B1) mostraron una correlación positiva significativa (0.786), lo cual indica que estos compuestos pudieron ser originados en fuentes en común.

La Tabla 6 muestra que durante el periodo del medio día, los BTEX no mostraron correlaciones significativas entre sí, lo cual indica que pudieron ser originados a partir de diferentes y diversas fuentes: emisiones evaporativas, actividad fotoquímica, fuentes de área y emisiones vehiculares. De acuerdo a la Tabla 7, durante el periodo de muestreo de la tarde, etilbenceno y tolueno mostraron una correlación significativa positiva (0.881), indicando que estos compuestos pudieron ser originados a partir de fuentes en común.

Variabes	BENCENO	TOLUENO	ETILBENCENO	XILENO
BENCENO	1	0.476	0.405	0.000
TOLUENO	0.476	1	0.286	0.095
ETILBENCENO	0.405	0.286	1	0.786
XILENO	0.000	0.095	0.786	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05

Tabla 5. Matriz de correlación de Spearman para las concentraciones de BTEX durante la temporada de lluvias 2022, para el muestreo de la mañana (B1).

Variabes	BENCENO	TOLUENO	ETILBENCENO	XILENO
BENCENO	1	0.503	-0.381	-0.071
TOLUENO	0.503	1	-0.359	-0.108
ETILBENCENO	-0.381	-0.359	1	0.619
XILENO	-0.071	-0.108	0.619	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05

Tabla 6. Matriz de correlación de Spearman para las concentraciones de BTEX durante la temporada de lluvias 2022, para el muestreo del medio día (B2).

Variabes	BENCENO	TOLUENO	ETILBENCENO	XILENO
BENCENO	1	0.143	0.095	0.357
TOLUENO	0.143	1	0.881	0.452
ETILBENCENO	0.095	0.881	1	0.500
XILENO	0.357	0.452	0.500	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05

Tabla 7. Matriz de correlación de Spearman para las concentraciones de BTEX durante la temporada de lluvias 2022, para el muestreo de la tarde (B3).

La Figura 9 muestra los resultados del análisis multivariado (análisis de componentes principales) de las concentraciones de BTEX durante a) periodo de la mañana, b) periodo del medio día y c) periodo de la tarde. Puede observarse que durante el periodo de muestreo de la mañana (Figura 9 a) se necesitaron 2



componentes principales para explicar el 83.35% de la variabilidad total de los datos, mostrando una fuerte relación entre tolueno-benceno y xileno-etilbenceno.

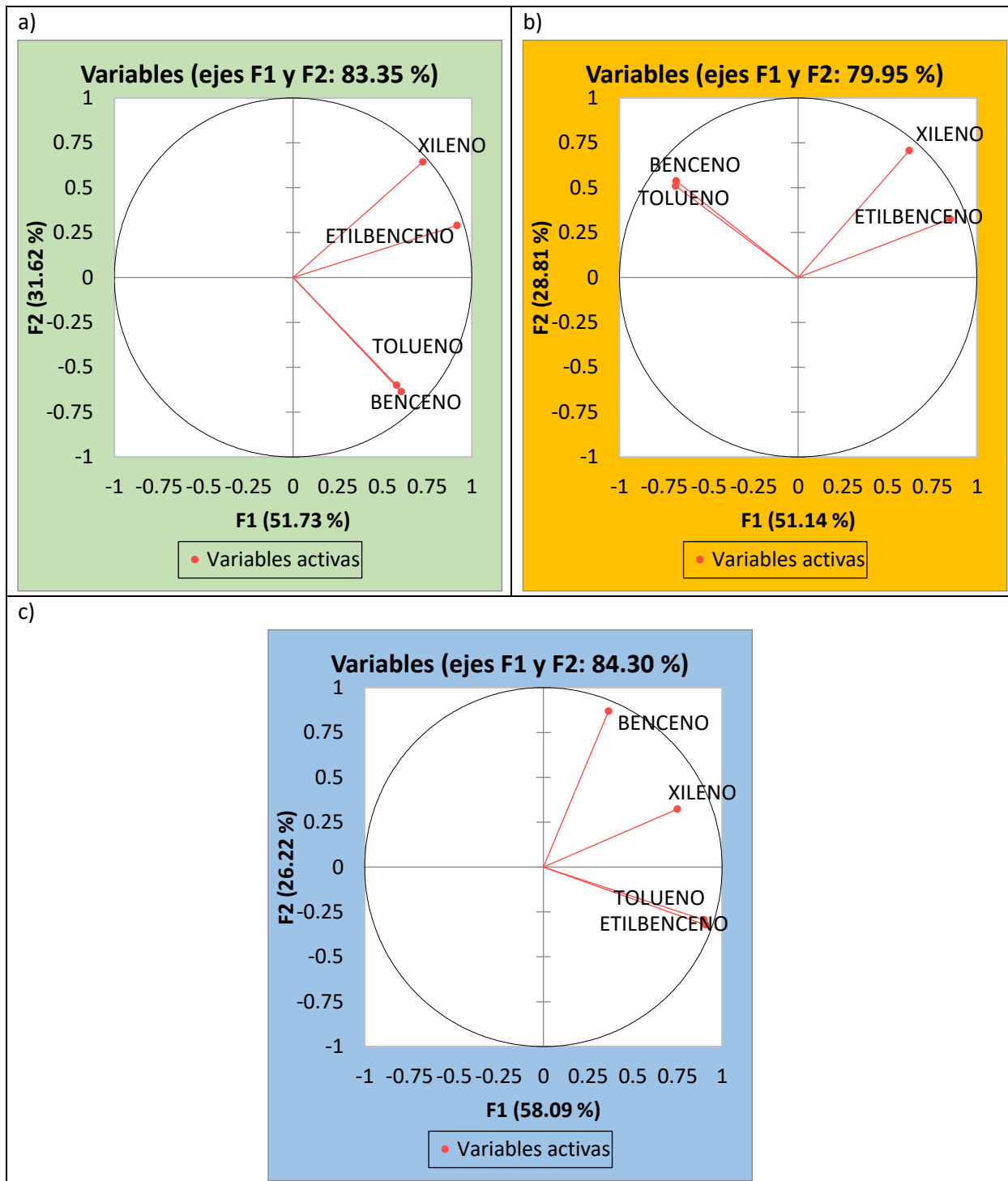


Fig.9. Resultados del análisis multivariado (análisis de componentes principales) de las concentraciones de BTEX durante a) periodo de la mañana, b) periodo del medio día y c) periodo de la tarde.



Durante el periodo de la tarde (Figura 9 b), se requirieron 2 componentes principales para explicar el 79.95 % de la variabilidad total de los datos, mostrando nuevamente el mismo comportamiento, relaciones estrechas entre benceno-tolueno y xileno-etilbenceno. La figura 9 c, muestra que se requirieron dos componentes principales para explicar el 84.30 % de la variación total de los datos, encontrándose una fuerte relación entre tolueno y benceno. La cercanía de los vectores en los biplot, indica que estos pares de compuestos fueron originados por fuentes en común o tuvieron un mismo origen.

3. Conclusiones

En el caso de los BTEX, se observó que ambos sitios de estudio mostraron mayores concentraciones para benceno y xilenos, siendo mayores las concentraciones durante el periodo de la mañana y medio día. Todos los BTEX medidos mostraron un comportamiento diurno, aunque las pruebas de hipótesis de Friedman revelaron que solo etilbenceno presentó diferencias significativas a un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ en sus concentraciones a lo largo del día.

Las razones de BTEX revelaron información sobre la contribución relativa de las fuentes en los sitios de estudio, en ambos casos, la razón T/B indicó que los niveles de BTEX estuvieron fuertemente influenciados por emisiones vehiculares, mientras que la razón X/E también indicó que hubo transporte de masas de aire conteniendo BTEX desde otras zonas cercanas, proviniendo desde el NE y SE en el sitio INAH y desde el E y SE en el sitio TNL. El análisis bivariado y multivariado reveló asociaciones entre benceno-tolueno y entre etilbenceno-xileno, indicando que ambos pares de compuestos pudieron ser originados de fuentes en común. El par benceno-tolueno a partir de emisiones de tipo vehicular, ya que ambos hidrocarburos son constituyentes de la gasolina, mientras que el segundo par pudo estar asociado a fuentes evaporativas y fuentes de área.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo otorgado a través de Proyecto: CI-02/2021 a "Determinación de metales pesados en muestras de partículas PM10 y Niveles atmosféricos de BTEX en dos sitios de Campeche. Los autores agradecen al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) sede Campeche, el apoyo otorgado y las facilidades para realizar el monitoreo atmosférico de partículas PM10, en las instalaciones del Edif. de la calle 59. Asimismo, agradecer a la Arq. Adriana Velázquez Morlet por su valioso apoyo para realizar el proyecto "Determinación de Metales Pesadas en muestras de partículas PM10 y niveles atmosféricos de BTEX en San Francisco de Campeche". En este trabajo se utilizaron muestreadores de bajo volumen tipo "minivol", adquiridos por el proyecto 1854: Consolidación de las capacidades científicas del Centro de Investigación en Corrosión de la UAC", del programa Investigadoras e Investigadores por México de CONACyT.

7. Referencias

- [1] Monteiro Martins E., Arbilla G., Favilla Bauerfeldt G. y De Paula M., "Atmospheric levels of aldehydes and BTEX and their relationship with vehicular fleet changes in Rio de Janeiro urban area", *Chemosphere* 67, 2007, pp. 2096-2103.
- [2] Atkins P. W. and Jones L., "Principios de química: los caminos del descubrimiento", Panamericana, tercera edición, 2005, pp. 691.
- [3] Zhang Y., Mu Y., Meng F., Li H., Wang X., Zhang W., Mellouki A., Gao J., Zhang X., Wang, S. and Chai F., "The pollution levels of BTEX and carbonyls under haze and non-haze days in Beijing, China", *Science*



of the Total Environment, 490, 2014, p.391-396.

- [4] Márc, M., Bielawska, M., Wardencki, W., Namiésnik, J., Zabiegala, B., “The influence of meteorological conditions and anthropogenic activities on the seasonal fluctuations of BTEX in the urban air of the Hanseatic City of Gdansk, Poland”, *Environ Sci Pollut Res* 22, 2015, 11940–11954.
- [5] Hellen, H., Hakola, H., Laurib, T., “Determination of source contributions of NMHCs in Helsinki using chemical mass balance and the Unmix multivariate receptor models”, *Atmos Environ.* 37, 2003, 1413-1424.
- [6] Karl T., Harley P., Emmons L., Thornton B., Guenther A., Basu C., Turnipseed A. and K. Jardine, “Revisiting the dry depositional sink of oxidized organic vapors to vegetation”, *Geophysical Research Abstracts*, 12 (452), 2010, pp.737-740.
- [7] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), “Toxicological profile for Toluene”, Atlanta, GA: US Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2015, . <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp56-c1-b.pdf>. Accessed 18 May 2020
- [8] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC, “Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones”, 2005, pp.506.
- [9] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, “Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1, 2, 4-trimetilbenceno) en aire – Método de adsorción en carbón activo/ Cromatografía de gases”, MTA/MA-030/A92, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, 2017.
- [10] Pekey B., and Yilma H. “The use of passive sampling monitor spatial trends of volatile organic compounds (VOCs) at one industrial city of Turkey”, *Microchemical Journal* 9 (2), 2011, pp. 213-219.
- [11] Elbir T., Cetin B., Cetin E., Bayram A., Odabasi M., “Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and their sources in the air of Izmir, Turkey”, *Environ. Monit. Assess.* 133, 2005, 149-160.
- [12] Mugica V., Ruiz M. E., Watson J., Chow J., “Volatile Aromatic Compounds in Mexico City atmosphere: Levels and Source apportionment”, *Atmosfera* 16, 2003, pp. 5-27.
- [13] Keymeulen R., Gogenyi M., Heberger K., Priksane A., Lagenhove H.V., “Benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes in ambient air and *Pinus silvestris* L. needles: a comparative study between Belgium, Hungary and Latvia”, *Atmos. Environ.* 35, 2001, 6327-6335.
- [14] Lee S.C., Chiu M.Y., Ho K., Zou S.C., Wang X., “Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong”, *Chemosphere* 48, 2002, pp. 375-382.
- [15] Kuntasal O. O., Karman D., Wang D., Tuncel S., Tuncel G., “Determination of volatile organic compounds in microenvironments by multibed adsorption and short-path thermal desorption followed by gas chromatographic-mass spectrometric analysis”, *Journal of Chromatography A* 1099, 2005, 43-54. [16] Wahab, A., Bakheit, C.S., Alawi, S.M., “Principal component and multiple regression analysis in modelling of ground-level ozone and factors affecting its concentrations”, *Environmental Modelling & Software* 20, 10, 2005, 1263-1271.
- [17] Caselli, M., Gennaro, G., Marzocca, A., Trizio, L., Tutino L, “Assessment of the impact of the vehicular traffic on BTEX concentration in ring roads in urban areas of Bari (Italy)”, *Chem.* 81, 2002, 306–311.
- [18] Marc, M., Namiesnik, J., Zabiegala, B., “BTEX concentration levels in urban air in the area of the Tri-City agglomeration (Gdansk, Gdynia, Sopot), Poland”, *Air Qual Atmos Health.* 7, 2014, pp. 489–504.
- [19] Menchaca, L., Mercado, R., Mendoza, A., “Diurnal and seasonal variation of volatile organic compounds in the atmosphere of Monterrey, Mexico”, *APR.* 6, 2015, p. 1073-1081.
- [20] Esplugues, A., Ballester, F., Estarlich, M., Llop, S., Fuentes, V., Mantilla, E., Iñiguez, C., “Indoor and outdoor air concentrations of BTEX and determinants in a cohort of one-year old children in Valencia, Spain”, *Sci Tot Env.* 409, 2010, 63–69.



- [21] Zhang, Y., Mul, Y., Liu, J., Mellouki, A., “Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China”, *JES*. 24, 2012, pp124–130.
- [22] Bravo, H., Sosa, R., Sanchez, P., Bueno, E., Gonzales, L., “Concentrations of benzene and toluene in the atmosphere of the southwestern area at the Mexico City Metropolitan Zone”, *Atmospheric Environment* 36, 2002, 3843–3849.
- [23] Ho, K.F., Lee, H., Tsai, W.Y., “Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong” *Sci. Total Environ.* 322, 2004, 155–166.
- [24] Yurdakul, S., Civan, m., Kuntasal, Ö ., Doğan, G., Pekey, H., and Tuncel, G., “Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere”, *Atmospheric Pollution Research* 9 (2), 2018, 189-206.
- [25] Alghamdi, M.A., Khoder, M., Abdelmaksoud, A.S. et al., “Seasonal and diurnal variations of BTEX and their potential for ozone formation in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia”, *Air Qual Atmos Health* 7, 2014, 467–480.
- [26] Tiwari, V., Hanai, Y., Masunaga, S., “Ambient levels of volatile organic compounds in the vicinity of petrochemical industrial area of Yokohama, Japan”, *Air Qual Atmos H* (3), 2010, 65–75.
- [27] Jia, M., Zhao, T., Cheng, X., Gong, S., Zhang, X., Tang, L., Liu, D., Wu, X., Wang, L., and Chen, Y., “Inverse relations of PM_{2.5} and O₃ in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China”, *Atmosphere*, 8 (5), 2017, 1-12.
- [28] Mokhtari, M., Hajizadeh, Y., Mohammadi, A., Miri, M., Abdollahnejad, A., & Niknazar, H., “Ambient variations of benzene and toluene in Yazd, Iran, using geographic information system”, *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences.*, 26 (138), 2016, 131–139.
- [29] Monod, A., Sive, B., Chen, T., Blake, D., Rowland, S., “Mono aromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene”, *Atmospheric Environment*. 35, 2001, pp. 135-149.