INFORME ANUAL
CALIDAD DEL AIRE 2018
CIUDAD DE MÉXICO

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | SEDEMA | CALIDAD DEL AIRE

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director General de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo de Calidad del Aire

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis y Modelación

Alfredo Alfonso Soler
Subdirector de Análisis Meteorológico

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo de Calidad del Aire

José Luis Del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas y Comunicaciones

Presentación

El deterioro de la calidad del aire en el Área Metropolitana de la Ciudad de México representa un riesgo importante, dadas las implicaciones que puedan derivarse para la salud, medio ambiente y materiales.

La calidad del aire depende, en gran medida, de la cantidad y las características de los contaminantes emitidos a la atmósfera por las diversas fuentes presentes en la ciudad. No obstante, existen factores meteorológicos que, asociados a condiciones geográficas, tienen un efecto importante en los niveles de concentración y distribución de los contaminantes, así como en la formación de nuevos compuestos en el aire ambiente.

El monitoreo sistemático de la calidad del aire permite ampliar el conocimiento de los mecanismos fisicoquímicos involucrados en el fenómeno de la contaminación atmosférica; su comprensión es fundamental para el diseño de estrategias efectivas y eficientes que contribuyan a mejorar la calidad del aire, a la evaluación del impacto real de los programas de gestión, así como para generar información confiable y oportuna que ayude a las autoridades en la toma de decisiones y a los ciudadanos en la prevención de riesgos a la salud.

En este contexto, me complace resaltar la experiencia y el liderazgo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, en lo que respecta a la vigilancia continua y la difusión de la información de calidad del aire, mediante el uso de más y mejores tecnologías, como medio para ampliar el conocimiento sobre la contaminación atmosférica, fortalecer la toma de decisiones en la gestión ambiental y en la protección de la salud. Asimismo, les presento el informe de calidad del aire 2018, que es uno de los principales instrumentos generados por el SIMAT para la difusión del conocimiento adquirido, mediante el análisis objetivo de los datos del monitoreo y su relación con los diversos factores que determinan la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana. En el informe se describe el estado actual con respecto a la normatividad vigente, así como el comportamiento espacial y temporal de los principales contaminantes atmosféricos, las tendencias de los contaminantes, el avance en las metas de la gestión de la calidad del aire y las estadísticas más importantes de los contaminantes medidos.

Esperamos que la información contenida sea de utilidad para los habitantes de la Ciudad de México y su área conurbada, especialistas, tomadores de decisiones y demás personas interesadas en el tema.

Secretaría del Medio Ambiente

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire

Diseño
Ramón Gaona Díaz

Integración del documento
Mónica Jaimes Palomera, Olivia Rivera Hernández, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez

Colaboraciones
Armando Retama (Carbono Negro, Capítulo 3), Omar Amador (capitulo 6)

D. R. © 2020
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
Plaza de la Constitución no. 1, 3er piso, colonia Centro, Cuauhtémoc, México D. F., C. P. 06068

La publicación en formato electrónico, así como los compendios en archivos electrónicos que forman parte de esta publicación están protegidos bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

La mención de marcas o compañías no implica que sean validadas o recomendadas por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. La Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire tomó todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en esta publicación. La responsabilidad de la interpretación y uso del material recae en el lector. En ningún caso la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México podrá ser considerada responsable de daño alguno causado por el uso indebido del documento por parte de terceros.

Citar este documento como:
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2020. **Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

CALIDAD DEL AIRE

La información contenida en este documento es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal técnico operativo de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire, quienes cada día realizan un esfuerzo importante con dedicación y compromiso.

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire
Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis y Modelación
Mónica Jaimes Palomera, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, José Alberto Aguilar Juárez, Alejandro Ruiz Olivares, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Antonio Terrazas Ahumada, Francisco Luna Falfan, Eduardo Preciado Martínez, José Francisco López Arana, Lidia Estrada Villegas, Sofia Fernanda Moreno Gillestegui, Citlali Mendoza Munguia, Laura Edith Ocampo Trejo, Víctor Jorge Taracena Morales.

Subdirección de Análisis Meteorológico
Alfredo Alfonso Soler, Marco Gabriel Hernández Hernández, José Ávalos Torres.

Subdirección de Monitoreo de Calidad del Aire
J. J. Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge Juan Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, Juan Manuel Campos Díaz, Julio César Argueta Rodríguez, Fernando Alonso Vega Bernal, Adrián Pérez Narváez, Antonio Silva Hernández, José Gabriel Elías Castro, Salvador Cervantes Garduño, Eugenio Rafael López Arredondo, Eloy Contreras Sánchez, Jorge Hernández Hernández, Jorge Alberto Rodas Rivera, Jesusyael Jiménez Valdez, Ángel César Sánchez Martínez, Luis Adrián Cruz Alavez, Ernesto González Carmona, José Salvador Juárez Mendoza, María del Rocío Carmona Mártir, Fernando Serralde Medina, Jesús Arriaga Falconi, Oscar Hernández Castillo, Anabel Rivera Arenas, María Dolores Maya Rojas, Viviana Jacqueline Campos Torres, Donaldo Manuel Godínez Ángeles, Ulises Josué López Fabián, Daniel Alejandro Rivera Ávila, Abraham López Dorantes, María Luisa Quintanar Chávez, Fernando Reyes Sandoval, Mariana Ramos Cerón.

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones
José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Ramón Gaona Díaz, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpízar, Gabriela Hernández Cruz, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Carlos Iván Aróstegui Gallardo, Víctor Manuel Muñoz Valladares, Luis Enrique Ruíz López, Moisés Castro Paniagua, Ivalu Loya Moreno.

Administración
Margarita Barrientos Contreras, Francisco Serrano Vázquez, Xóchitl Loretto Carmona, Carla Fernanda Mayorga Domínguez, Gerardo Samuel López Venegas.

En la elaboración de este informe se contó además con la colaboración de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera y del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Centro de Ciencias de la Atmósfera
Análisis del depósito atmosférico: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Mtra. Ana Luisa Alarcón Jiménez, María del Carmen Torres Barrera.

Especiación química de aerosoles orgánicos atmosféricos: Dr. Amador-Muñoz Omar, Martínez-Domínguez Y. Margarita, Reyes-Gutiérrez Jessica A., Franco-Hernández Alejandro I.

Soporte técnico: Abraham Lara, Wilfrido Gutiérrez, Manuel García y Alfredo Rodríguez. Apoyo editorial y bibliográfico: Claudio Amescua, Saúl Armendariz y Pietro Villalobos.

Financiamiento: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM No. IN102519.

Instituto de Geofísica (radiación solar global)
Dr. Mauro Valdéz Barrón.

También se reconoce todo el apoyo brindado por las diferentes áreas operativas de la Dirección Ejecutiva de Administración.

Índice

Resumen ejecutivo **10**

1. Cumplimiento de la Normatividad **15**
Dióxido de azufre (SO_2) 18
Dióxido de nitrógeno (NO_2) 20
Monóxido de carbono (CO) 22
Ozono (O_3) 24
Partículas menores a 10 µm (PM_{10}) 26
Partículas menores a 2.5 µm ($PM_{2.5}$) 28
Plomo (Pb) 30

2. El Tiempo. Comportamiento de las variables meteorológicas **33**
Temperatura 35
Humedad Relativa 37
Precipitación pluvial 38
Presión barométrica 40
Viento 41
Radiación solar 43

3. Calidad del aire **49**
Dióxido de azufre 50
Óxidos de nitrógeno 54
Monóxido de carbono 60
Ozono 63
Partículas suspendidas 66
Índice de calidad del aire 74
Carbono Negro 77
Tendencias 84

4. Eventos de alta concentración de ozono y partículas **91**
Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas 92
Evento de concentración alta por O_3: 4 de mayo de 2018 93
Activación Fase I por O_3: 6 de junio 95
Evento de concentración alta por O_3: 23 de noviembre 95
Activación Fase I Regional por PM_{10}: 25 de diciembre 99

5. Depósito Atmosférico **103**
Composición, pH y lluvia ácida 104
pH 105

Composición iónica 110
Depósito atmosférico húmedo 113

6. Especiación química horaria de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos 117
Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en $PM_{2.5}$ 118
Método 120
Resultados 120
Conclusiones 125

7. Referencias 126

8. Anexos 134

Dedicamos este informe en honor y memoria
de dos personas entrañables y muy queridas del SIMAT:

Luis Adrián Cruz Alavez (1982-2019),
compañero y amigo, que dedicó toda su vida profesional
a la determinación de los precursores del smog fotoquímico en el laboratorio de análisis ambiental.
Su último trabajo se ve reflejado en el artículo científico:
Zavala, M., Brune, W., Velasco, E., Retama, A., Cruz, A., Molina, L. (2020).
Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere in the Mexico City Metropolitan Area.
Atmospheric Environment. V. 238, 117747 (2020).

Ramón Gaona Díaz (1975-2020),
un integrante fundamental en el desarrollo de la imagen del SIMAT,
un gran amigo y compañero, que compartió su creatividad, iniciativa y visión al SIMAT,
donde desarrolló la mayor parte de su vida profesional.
Este informe es su último trabajo de edición que realizó y quedará como parte de su legado.

Todos los que los conocimos y tratamos,
sabemos que fue un gran honor trabajar con ellos y quedaremos siempre agradecidos
por toda su entrega, profesionalismo y compañerismo que tuvieron dentro del SIMAT,
¡no los olvidaremos!*!*

Resumen ejecutivo

Las condiciones meteorológicas observadas en 2018 fueron favorables para la dispersión de los contaminantes durante la mayor parte del año. De marzo a mayo, que son meses correspondientes a la temporada de ozono, se presentaron 14 sistemas frontales y estos propiciaron condiciones de inestabilidad atmosférica. En la primera parte del 2018, se presentaron condiciones de La Niña débil y a partir de mediados de abril se transitó hacia condiciones Neutrales, las cuales se mantuvieron hasta el mes de diciembre. La temperatura ambiente anual en 2018 fue 16.7 °C y, con relación a los datos históricos, se presentaron anomalías positivas en varios meses del año, con la máxima en marzo (1.4 °C mayor al valor histórico), mientras que las anomalías negativas se presentaron en enero, abril y agosto. En el caso de abril, un mes de la seca caliente, su anomalía negativa (-0.5 °C) estuvo relacionada con los frentes fríos No. 43, 44 y 49. El periodo de lluvias estuvo influenciado por la fase neutra de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en el Pacífico Ecuatorial y otros patrones de circulación, que ocasionaron que la precipitación en 2018 estuviera por debajo del promedio histórico (1995 - 2017). El máximo de precipitación acumulada mensual se registró en agosto y este mes estuvo influenciado por la entrada de 11 ondas tropicales. El comportamiento del viento en 2018 fue similar al 2017, con un promedio anual de 2 m/s y en abril, mayo e inicios de junio se presentaron valores altos de velocidad de viento, lo que favoreció la dispersión de contaminantes durante la temporada de ozono. En el caso de la radiación solar ultravioleta (UV) en el periodo diurno (08:00 a 20:00 h) tuvo un promedio anual de 2.0 y 0.09 W/m² para UV-A y UV-B, respectivamente. El índice UV (IUV) reportó valores altos que son de riesgo para la salud humana en la mayor parte del año, y el máximo se presentó entre las 11:00 a las 15:00 h. El IUV alcanzó valores de intensidad ALTA en 40 días del año, MUY ALTA durante 125 días y un IUV EXTREMADAMENTE ALTO en 197 días. Los meses de junio a agosto fueron los que registraron los valores más altos del IUV.

En términos del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental, el año 2018 fue similar a los años anteriores. La concentración de SO_2, CO y NO_2, se mantuvo por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en las NOM; sin embargo, el O_3, así como PM_{10} y $PM_{2.5}$, aún rebasan sus valores normados durante la mayor parte del año, especialmente en las temporadas de ozono y de partículas. El SO_2 registró un promedio anual de 4.3 ppb en toda la ZMCM, mientras que para la Ciudad de México fue de 3.9 ppb, en las estaciones ubicadas en el Estado de México fue mayor con 4.6 ppb. Para los óxidos de nitrógeno, los promedios anuales de NO, NO_2 y NOx fueron: 16, 25 y 41 ppb, respectivamente. Los niveles de concentración de estos compuestos presentan una tendencia decreciente con una reducción del 3 % comparada con 2017. El CO registró una concentración anual de 0.4 ppm en toda la zona metropolitana, lo cual representa el valor mínimo registrado históricamente. El O_3 obtuvo un promedio anual de 30 ppb y un promedio de los máximos diarios de 100 ppb, lo que representa una ligera reducción para ambos indicadores en comparación con 2017. El número de horas con valores superiores a 95 ppb (NOM), se registraron en 678 horas distribuidas en 210 días. En partículas, los promedios anuales del monitoreo continuo fueron de 82 µg/m³ para PM_{10}; 29 µg/m³ en $PM_{2.5}$; y 44 µg/m³ en la fracción $PM_{10-2.5}$. El máximo del

promedio de 24 h se registró en las estaciones del norte con 199 µg/m^3 para PM_{10}; 118 µg/m^3 para $PM_{2.5}$, ambos valores durante el 25 de diciembre, ocasionado por la quema de fuegos pirotécnicos. Finalmente, el máximo de $PM_{10-2.5}$ fue 117 µg/m^3, el 10 de enero.

El índice de calidad del aire registró 89 días dentro de las categorías BUENA y REGULAR, que corresponden a valores menores de 100 puntos del índice (valor equivalente a la NOM), mientras que se presentaron 271 en categoría MALA y 5 con MUY MALA calidad del aire, esta última banda del índice está relacionada con los valores mayores a 150 puntos, los cuales se distribuyen en tres días para ozono, un día para la combinación $PM_{10-2.5}$ y un día para PM_{10}. La categoría MUY MALA representa el límite en el cual se declara la FASE I del Programa de Contingencia Ambiental Atmosférica (PCAA) para O_3 y PM_{10}. En 2018, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) activó el PCAA en dos ocasiones, el 6 de junio para O_3 y el 25 de diciembre para PM_{10}, en el caso de ozono ocasionado por condiciones meteorológicas adversas para la dispersión y en PM_{10} fue provocado por la quema de fuegos pirotécnicos en la ZMCM. Los días restantes con valores superiores a 150 puntos del índice, no ameritaron la activación del PCAA debido a que las condiciones del día siguiente eran favorables para la dispersión de los contaminantes. En términos de la tendencia de los contaminantes, se observó que la reducción en la concentración ha sido congruente con la aplicación de medidas y programas de calidad del aire ya que, desde finales de los noventas, se presentan disminuciones en la mayoría de los contaminantes. En 2018, todos los contaminantes presentan decrementos en comparación con 2017 y con respecto a los datos históricos, los contaminantes que presentaron mayor porcentaje de reducción son CO y SO_2 con 78 y 67%, respectivamente. Mientras que la mínima reducción fue en PM_{10} (16 %), $PM_{2.5}$ (9 %) y NO_2 (12 %). En el caso de ozono, a partir del 2006, se observa una estabilidad en la variación con porcentajes entre 34 y 39%.

El análisis de la concentración de carbono negro presentó valores de un promedio anual de 2.8 µg/m^3 y fue menor por 0.1 µg/m^3 al registrado en 2017. El máximo del promedio anual y promedio de 24 h se registró en la estación Xalostoc (XAL) con 4.5 y 14.5 µg/m^3, respectivamente. La estación Pedregal (PED) reportó, al igual que en 2017, el valor anual mínimo con 1.6 µg/m^3. Adicionalmente, se determinó que la fracción de carbono negro contribuyó con 11% en la masa total de $PM_{2.5}$ y presentó el mayor aporte en Xalostoc con 14% y el mínimo en PED con el 8%.

En la temporada de lluvia se registró lluvia ácida en toda la ZMCM; sin embargo, la mayor cantidad de muestras ácidas se encontraron al sur de la ciudad, principalmente en el suelo de conservación, con un valor de mínimo de pH 3.86 en la estación Milpa Alta (MPA). El pH más alto, es decir el más básico, se registró en la estación Museo de la Ciudad de México (MCM) con un valor de 7.62. Los iones más abundantes en la lluvia fueron amonio, sulfato y calcio, los cuales aportaron el 34.7, 22.6 y 18.1%, respectivamente. Los promedios más altos del depósito acumulado fueron para sulfato con 25.8 kg/ha, nitratos con 25.0 kg/ha y amonio con 15.45 kg/ha.

En 2017, la SEDEMA adquirió un Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos acoplado a un Cromatógrafo de Gases y Espectrometría de Masas (TAG-GC-MS), con el objetivo de analizar la especiación de los compuestos orgánicos de origen primario y secundario, esto se llevó a cabo en colaboración con el Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la UNAM (CCA). En este informe anual se presentan los

resultados de la primera campaña con TAG-GC-MS (5 de noviembre al 15 de diciembre del 2018), así como la variación diaria y horaria de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en la fracción orgánica de $PM_{2.5}$. En los análisis se diferenciaron dos periodos, en el primero la concentración promedio de HAP fue <1100 pg/m^3 y en el segundo periodo, se elevó hasta 3000 pg/m^3. El perfil horario de los HAP cancerígenos presentó dos máximos, uno en la mañana (7:00-8:00 h) y el segundo en la noche (21:00 – 22:00 h), congruente con el comportamiento de CO y NOx, por lo que están relacionados con el flujo vehicular. Adicionalmente se identificó el reteno, un HAP marcador de la quema de biomasa, el cual presenta un perfil distinto al resto de los HAP, y su máximo se presentó en la noche (21:00 – 02:00 h), lo que sugiere que la quema de biomasa es una fuente importante de $PM_{2.5}$ al suroeste de la ciudad y que, además, es una actividad recurrente, probablemente desarrollada para la cocción de alimentos y el calentamiento en los hogares.

1

CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD

Estado de la calidad del aire con respecto a las Normas Oficiales Mexicanas

La Organización Mundial de la Salud (OMS) propone una guía de calidad del aire, en la cual recomienda valores límite de concentración, con el fin de reducir el riesgo en salud de la población relacionado con la contaminación en exteriores. Uno de los aspectos que preocupa a la comunidad, es sí las normas nacionales deben coincidir con los valores que recomienda la OMS en sus guías de calidad del aire, cuando es probable que no se puedan alcanzar en el corto o mediano plazo con los recursos disponibles. La OMS establece que el objetivo de la gestión de la calidad del aire y la reducción de los riesgos para la salud en todos sus aspectos debe considerar la aplicación y cumplimiento de los valores guía. Sin embargo, la OMS toma en cuenta que, en cada país, las normas nacionales pueden variar en función del enfoque adoptado, con el fin de equilibrar los riesgos para salud, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos, así como otros factores políticos y sociales de diversa índole, que a su vez dependerán, del nivel de desarrollo y la capacidad nacional con relación a la gestión en las acciones realizadas para reducir las emisiones que generan la contaminación. Por lo tanto, la OMS estableció valores intermedios 1, 2 y 3 con el objetivo de que los países alcancen los niveles de la guía de forma progresiva, conforme cambian las condiciones de una nación y mejora la relación científica entre la calidad del aire, la salud de la población y la calidad del ambiente (OMS, 2017).

Es así como la OMS reconoce que, cuando los gobiernos fijan objetivos para sus políticas públicas ambientales, deben estudiar con cuidado y detalle las condiciones locales propias de su país o ciudad, antes de adoptar los valores guía como normas con validez jurídico. A continuación, y para evitar cualquier confusión se presentan las definiciones de la OMS con respecto a los siguientes términos:

Guía. Este término se define como cualquier tipo de recomendación u orientación sobre la protección de humanos o cualquier receptor ambiental que pueda presentar efectos adversos por la contaminación del aire. No está restringido a un valor numérico sino también puede expresarse como información dosis-respuesta o estimación de riesgo unitario entre otras formas más.

Valor de referencia. Es un valor numérico expresado en concentración del aire ambiente o como un nivel de deposición, que está vinculado a un tiempo promedio. En el caso de la salud humana, el valor de referencia proporciona una concentración por debajo de la cual no se prevén efectos adversos, ni molestias de importancia para la salud, aunque no garantiza la exclusión de los efectos para algunas personas.

Estándar o norma. Se considera como el nivel de concentración o de depósito de un contaminante del aire, que es adoptado por una autoridad reguladora como exigible. A diferencia del valor de referencia, se debe especificar otros elementos además del nivel de efecto-base y el tiempo promedio en la formulación del estándar. Estos elementos son: **a)** estrategias de medición; **b)** procedimiento del manejo de los datos; **c)** el estadístico que se utiliza para obtener el indicador que será comparado con el valor del estándar. Adicionalmente, se debe incluir el número de veces permitido para exceder este valor límite.

En nuestro país, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) es

la institución encargada de la elaboración de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de salud ambiental relacionadas con los valores límites permisibles de concentración de contaminantes criterio[1] en el aire de una ciudad o zona metropolitana del país.

El propósito principal de las NOM es proteger la salud de la población, y particularmente a los grupos susceptibles (niños, adultos mayores, mujeres embarazadas, personas con enfermedades crónicas respiratorias o cardíacas) de los efectos a corto y largo plazo relacionados con la contaminación del aire. El cumplimiento de la normatividad, así como la aplicación de medidas para la reducción de la contaminación, es responsabilidad del gobierno federal y local. En la **Tabla I.1** se presentan las normas de salud ambiental vigentes en 2018, para cada una, se especifican los valores límite, el tipo de indicador estadístico para su evaluación, así como la fecha de la última actualización.

Tabla I.1. Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental vigentes en 2018.

Contaminante	NOM vigente	Especificaciones	Última actualización
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	95 ppb Promedio horario 70 ppb Promedio móvil de 8 h	19 de agosto del 2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm Promedio móvil de 8 h	23 de diciembre de 1994
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2010	110 ppb Promedio de 24 h 200 ppb Promedio móvil 8 h, 2.º máximo 25 ppb Promedio anual	8 de septiembre del 2010
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1993	210 ppb Promedio horario	23 de diciembre de 1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m^3 Promedio de 24 h 40 µg/m^3 Promedio anual	20 de agosto del 2014
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)		45 µg/m^3 Promedio de 24 h 12 µg/m^3 Promedio anual	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m^3 Promedio trimestral	23 de diciembre de 1994

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación del cumplimiento de las NOM para el aire ambiente de la Ciudad de México y municipios conurbados del Estado de México que conforman la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), durante el año 2018 para cada uno de los contaminantes criterio, se describe su situación con respecto a los valores límite de la NOM, además se hace una comparación de los niveles observados en la ZMCM contra los valores límite de los estándares vigentes de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés) y con las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En esta evaluación se utilizó el valor del estadístico requerido por la NOM, los estándares de la U.S. EPA y las guías de la OMS. Se analizó el cumplimiento de los límites para la ZMCM y

[1]Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Se miden de manera continua o por muestreos y son: ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), las partículas en suspensión (PM_1, $PM_{2.5}$) y el plomo (Pb).

el desglose para las dos entidades federativas que la conforman, Ciudad de México y Estado de México. Para el detalle de la evaluación del cumplimiento de las NOM durante 2018 para cada una de las estaciones de monitoreo, se recomienda revisar el **Anexo 4** de este Informe anual.

Así mismo, es importante mencionar que para realizar la comparación de los niveles de contaminantes gaseosos (O_3, CO, SO_2 y NO_2) con los valores guía de OMS, se realiza la conversión de ppb a µg/m^3, de los valores obtenidos en las estaciones de monitoreo del SIMAT, a condiciones locales de temperatura y presión, con el fin de que sean comparables con los valores guía OMS. Para el año 2018, las condiciones de ajuste utilizadas son 17 °C y 585 mmHg.

Dióxido de azufre (SO_2)

En la Ciudad de México y área conurbada, la fuente más importante de dióxido de azufre se localiza fuera de la zona metropolitana, en el corredor industrial de Tula-Tepeji, ubicado en el estado de Hidalgo. Debido a la cercanía y a los patrones de viento predominantes de norte a sur, se puede observar el transporte de las emisiones de la refinería y termoeléctrica dentro de dicha zona industrial al noroeste de la ZMCM, lo que ocasionalmente se ve reflejado en incrementos extraordinarios de concentración horaria de SO_2 mayores a 300 ppb. Dicho fenómeno se observa generalmente en las mañanas, durante los meses en los que se registra la mayor frecuencia de inversiones térmicas (entre noviembre y marzo).

Al evaluar los indicadores de las NOM que se registraron en 2018, estos no rebasan los valores límites en ambas entidades federativas: CDMX y Estado de México. La estación que presentó el valor más alto del indicador 2.° máximo del promedio de 8 h fue Cuautitlán (CUT) con 125 ppb, mientras que para el indicador del promedio de 24 h fue Villa de las Flores (VIF) con 72 ppb, ambas estaciones al norte de la ZMCM y donde se presentan con mayor frecuencia las concentraciones más altas.

En la **Tabla I.2** se presentan los valores máximos correspondientes a cada uno de los indicado-

Tabla I.2. Comparación de datos de concentración máxima de SO_2 con respecto a los valores límite de la NOM-022-SSA1-2010, el estándar de la U.S. EPA y los valores guía OMS.

	NOM			OMS	U.S. EPA
	Máximo 24 h	**2.° máximo 8 h**	**Promedio anual**	**Máximo 24 h**	**Promedio trianual percentil 99**
	110 ppb	**200 ppb**	**25 ppb**	**20 µg/m^3**	**75 ppb**
ZMCM	72 ppb	125 ppb	8 ppb	149 µg/m^3*	169 ppb
Ciudad de México	42 ppb	67 ppb	6 ppb	87 µg/m^3*	109 ppb
Estado de México	72 ppb	125 ppb	8 ppb	149 µg/m^3*	169 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17 °C

res normados. Es importante mencionar que el dióxido de azufre no rebasa la normatividad nacional desde 2006. Sin embargo, cuando se compararon los valores máximos de concentración para el promedio de 24 h con el valor guía de la OMS, y el estándar de la U.S. EPA, se superan sus valores límites respectivos en ambas entidades federativas de la ZMCM, los máximos registrados se presentaron en las estaciones Cuautitlán (CUT) en el Estado de México y Merced (MER) en la CDMX.

Las estaciones al norte de la ZMCM son la que registran los valores de los tres indicadores de la NOM-022-SSA1-2010 más altos, esto es debido a que dichas estaciones se ubican en la trayectoria de la pluma de contaminación proveniente de Tula-Tepeji (**Figura I.1**).

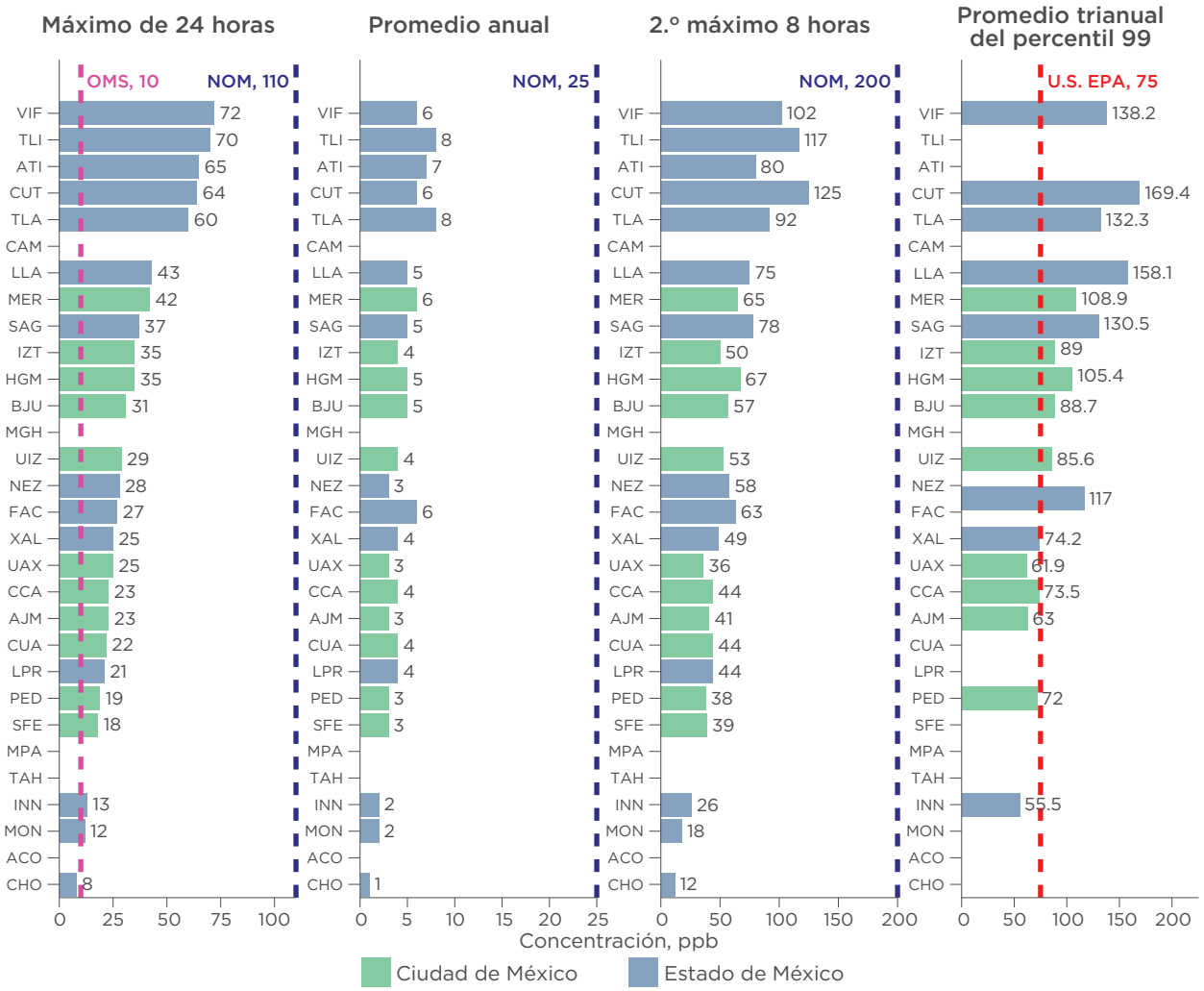


Figura I.1. Evaluación del cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2010, guías de OMS y estándar de U.S. EPA de SO_2 por estación. Presenta el valor máximo del promedio de 24 horas, promedio anual, 2° máximo de 8 h y del promedio trianual del percentil 99. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS (convertido a ppb en condiciones locales), la línea roja es el valor que corresponde al límite de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

Dióxido de nitrógeno (NO_2)

La concentración de dióxido de nitrógeno en la ZMCM no rebasa el límite normado en la NOM-SSA1-023-1993 desde 2010. Durante el 2018, el valor máximo para el promedio de 1 h se observó en la estación Tlalnepantla (TLA) ubicada en el Estado de México. En la comparación de los datos registrados en las estaciones del SIMAT con los valores e indicadores de la guía de la OMS (**Figura I.2**), se observó que el máximo horario y el promedio anual de concentración en la estación Tlalnepantla (TLA), rebasa el valor recomendado por la OMS. En la CDMX se rebasa el indicador anual de la OMS en estaciones como Camarones (CAM), Merced (MER) y Hospital General (HGM).

Con respecto al estándar de la U.S. EPA, el promedio trianual del percentil 99 de la concentración horaria de NO_2 fue ligeramente mayor al límite establecido por dicha agencia y en la CDMX, el máximo se presentó en la estación Miguel Hidalgo (MGH) mientras que en el Estado de México fue en la estación Tlalnepantla (TLA) y el máximo para el indicador anual de la U.S. EPA no fue rebasado en toda la ZMCM (**Tabla I.3**).

Tabla I.3. Comparación de datos de concentración máxima de NO_2 con respecto a los valores límite de la NOM-023-SSA1-1993, el estándar de la U.S. EPA y los valores guía OMS.

	NOM	OMS		U.S. EPA	
	No exceder máximo 1 h	Máximo 1 h	Promedio anual	Percentil 99 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m³	40 µg/m³	100 ppb	53 ppb
ZMCM	0 horas	210 µg/m³*	51 µg/m³*	106 ppb	34 ppb
Ciudad de México	0 horas	195 µg/m³*	51 µg/m³*	106 ppb	34 ppb
Estado de México	0 horas	210 µg/m³*	48 µg/m³*	99 ppb	32 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17 °C

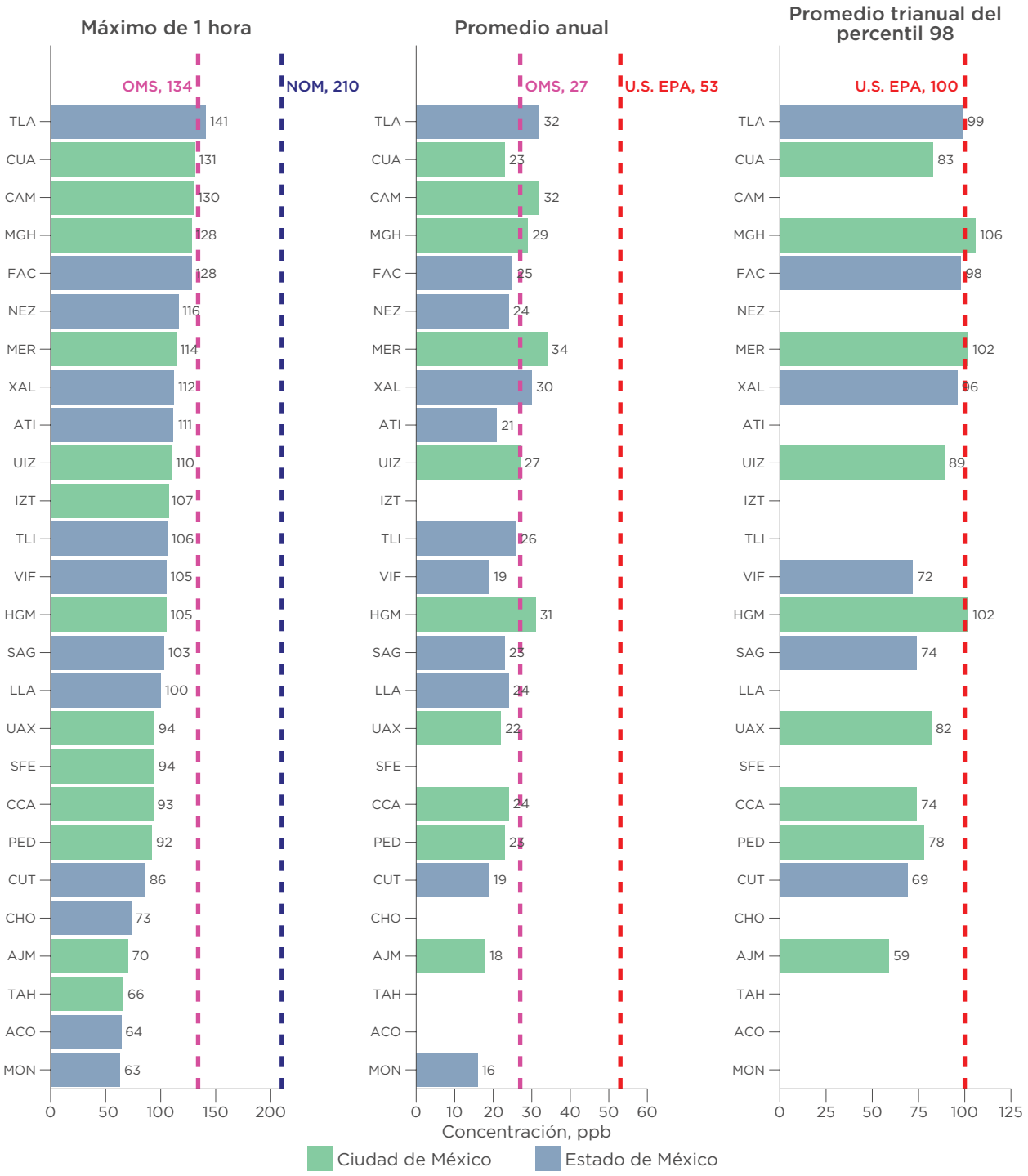


Figura I.2. Evaluación del cumplimiento de la NOM-023-SSA1-1993, guías OMS y estándar de la U.S. EPA de NO_2 por estación. Presenta el valor máximo del promedio horario, promedio anual y del promedio trianual del percentil 98. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS (convertido a ppb en condiciones locales), la línea roja indica el estándar de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

Monóxido de Carbono (CO)

La concentración del monóxido de carbono se ha mantenido por debajo del límite de la norma NOM-SSA1-021-1993 desde el año 2001 pero además los valores máximos de concentración del contaminante cumplen con la guía de la OMS y los estándares de la U.S. EPA. En el 2018, no se registraron valores superiores a la NOM, los valores máximos de concentración se presentaron en las estaciones que se ubican cerca de vialidades con alto tránsito vehicular. En la **Figura I.3** se presenta el máximo por estación para el promedio móvil de 8 h, el cual se registró en Nezahualcóyotl (NEZ) y en Xalostoc (XAL), ubicadas en el Estado de México, mientras que el máximo en la CDMX se presentó en la estación Iztacalco (IZT). En comparación con los estándares y valores internacionales, los niveles del contaminante en la ZMCM cumplieron con el valor de U.S. EPA y la guía de la OMS, con los niveles máximos registrados en el Estado de México para ambos indicadores, promedio móvil de 8 h y el máximo horario (ver **Tabla 1.4**).

Tabla I.4. Comparación de datos de concentración máxima de CO con respecto a los valores límite de la NOM-021-SSA1-1993, el estándar de la U.S. EPA y los valores guía OMS.

	NOM	OMS		U.S. EPA	
	MÁXIMO 8 h	**MÁXIMO 1 h**	**MÁXIMO 8 h**	**MÁXIMO 1 h**	**MÁXIMO 8 h**
	11 ppm	**30,000 µg/m³**	**10,000 µg/m³**	**35 ppm**	**9 ppm**
ZMCM	3.2 ppm	4,892 µg/m³*	2,899 µg/m³*	5.4 ppm	3.2 ppm
Ciudad de México	2.3 ppm	4,076 µg/m³*	2,083 µg/m³*	4.5 ppm	2.3 ppm
Estado de México	3.2 ppm	4,892 µg/m³*	2,899 µg/m³*	5.4 ppm	3.2 ppm

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17 °C

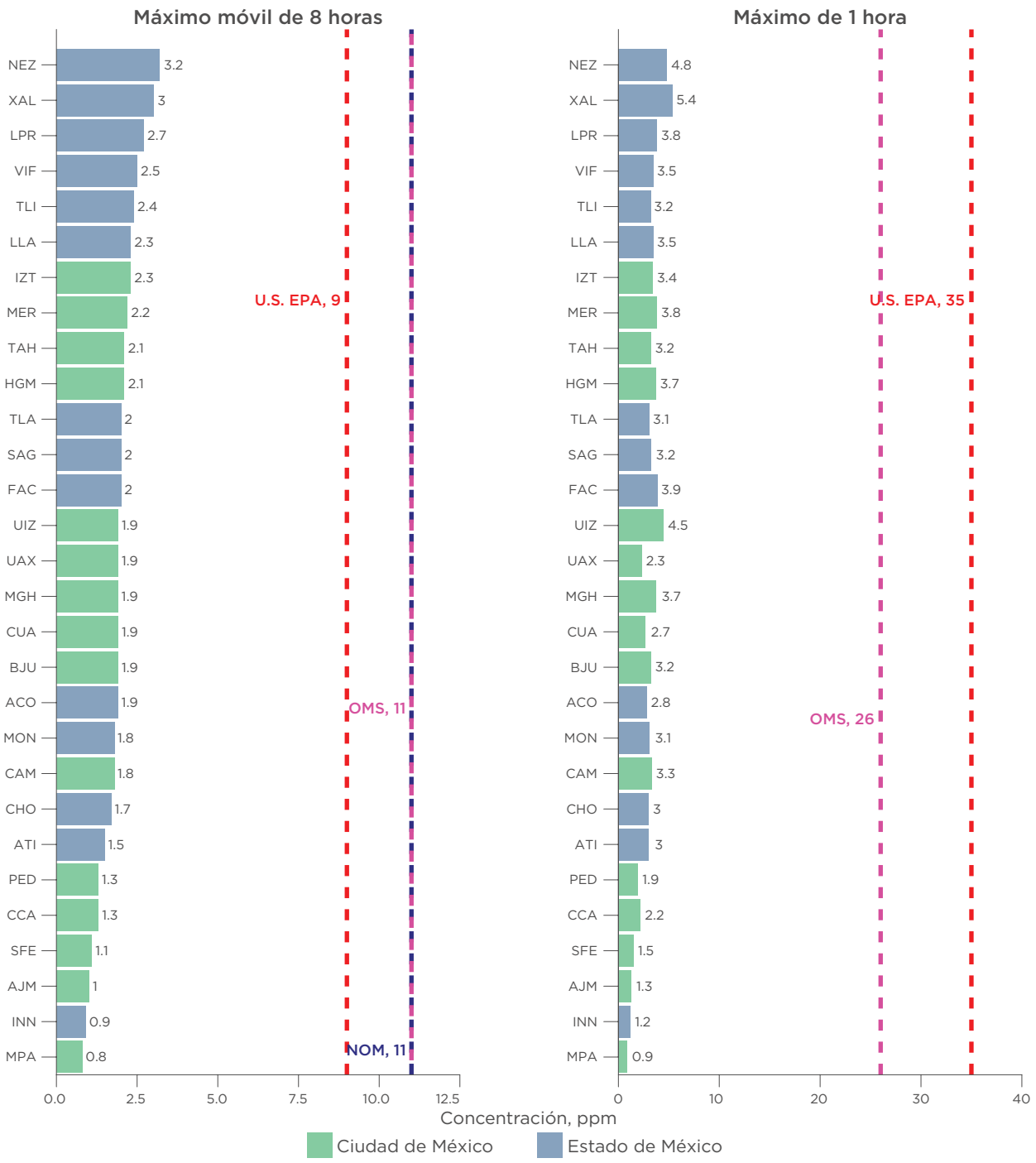


Figura I.3. Evaluación del cumplimiento de la NOM-021-SSA1-1993, guías OMS y estándar de la U.S. EPA de CO por estación. Presenta el valor máximo del promedio móvil de 8 horas y el máximo horario. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS (convertido a ppm en condiciones locales), la línea roja es el valor que corresponde al límite de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

Ozono (O_3)

En la Ciudad de México y área conurbada, el ozono es uno de los contaminantes que frecuentemente rebasa la NOM de Salud Ambiental (NOM-020-SSA1-2014) durante todo el año, lo cual se presenta con mayor frecuencia en la temporada de ozono, la cual comprende del 15 de febrero al 15 de junio. En esta época del año predominan condiciones favorables para que la concentración de ozono alcance sus valores máximos, esto se debe a las condiciones de estabilidad atmosférica, alta radiación solar, temperaturas elevadas, poca nubosidad, vientos débiles y sistemas de alta presión. Estos factores meteorológicos, que son característicos de la temporada seca caliente (marzo a junio) propician valores altos del contaminante.

En 2018, las altas concentraciones de ozono registraron valores mínimos en comparación con años anteriores, por lo que se consideró un año moderadamente limpio al igual que 2012 en cuanto a eventos altos de concentración, sin embargo, en cuanto a la evaluación de la normatividad mexicana e internacional de O_3, se rebasaron los estándares de NOM, la U.S. EPA y las guías de la OMS.

En la **Tabla I.5** se presenta la comparación de los valores máximos por ZMCM, CDMX y Estado de México con el cumplimiento de los valores de la NOM, OMS y U.S. EPA. Mientras que en la **Figura I.4** se presenta el desglose de cada indicador por estación de monitoreo y entidad federativa, en la cual se puede observar que las estaciones que se ubican al suroeste de la zona metropolitana, como Pedregal (PED) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA), registran el mayor número de horas con concentración superior a 95 ppb, esto es un patrón frecuente debido a los vientos dominantes durante el año tienen una dirección norte a sur, aunado a esto, existe una barrera natural montañosa en la zona sur, la cual impide la dispersión de los precursores de ozono y de los demás contaminantes, lo que ocasiona su estancamiento en esta zona. En el Estado de México, la estación con mayor número de horas fue la FES Acatlán (FAC). Para la comparación de los indicadores del máximo del promedio móvil de 8 h, se observó que ninguna estación cumple con el valor de la NOM o con la guía de la OMS y del estándar de la U.S. EPA, además la mayoría de las estaciones que presentan los valores máximos se encuentran en la Ciudad de México.

Tabla I.5. Comparación de datos de concentración máxima de O_3 con respecto a los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014 los valores guía de la OMS y el estándar de la U.S. EPA

	NOM		OMS	U.S. EPA
	NO EXCEDER MÁXIMO 1 h	MÁXIMO 8 h	MÁXIMO 8 h	4.º MÁXIMO DEL PROMEDIO 8 h EVALUADO EN 3 AÑOS
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m³	75 ppb
ZMCM	744 horas	120 ppb	186 µg/m³*	119 ppb
Ciudad de México	653 horas	120 ppb	186 µg/m³*	119 ppb
Estado de México	414 horas	117 ppb	182 µg/m³*	105 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17 °C

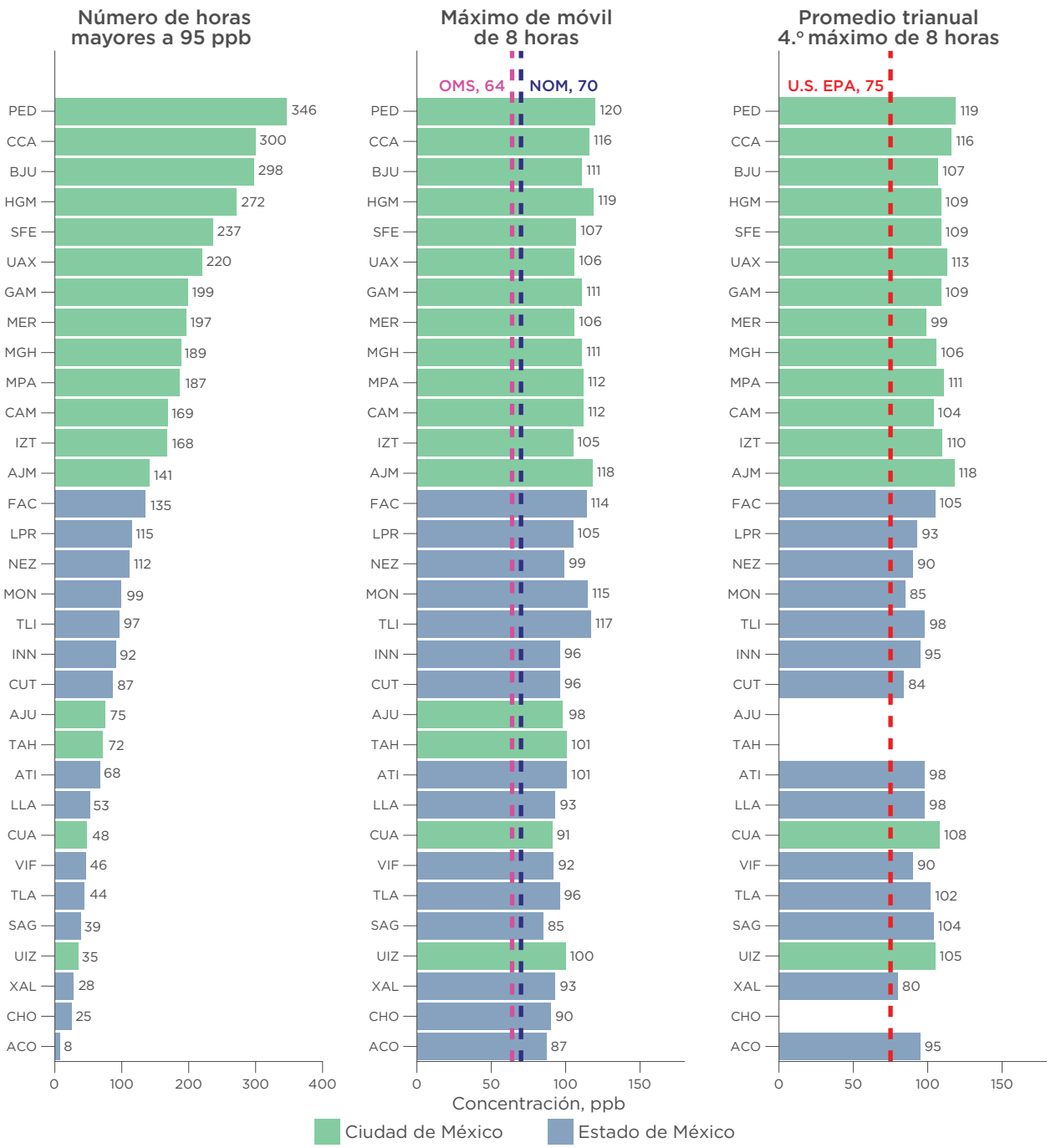


Figura I.4. Evaluación del cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014, guías OMS y estándar de la U.S. EPA de O_3 por estación. Presenta el número de horas que rebasan el valor horario de 95 ppb, el valor máximo del promedio móvil de 8 h y del promedio trianual del 4° máximo de 8 h. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS (convertido a ppb en condiciones locales), la línea roja indica el estándar de la U.S. EPA y la línea azul el valor límite de la NOM.

Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})

En la ZMCM, las PM_{10} son un problema recurrente de calidad del aire durante el año, especialmente en la temporada seca fría (noviembre a febrero), la cual presenta constantes inversiones térmicas que originan una acumulación de las emisiones de PM_{10}, por lo que también es uno de los contaminantes que frecuentemente rebasa la NOM de Salud Ambiental (NOM-025-SSA1-2014).

En 2018, la evaluación de la normatividad mexicana e internacional de la concentración de PM_{10}, indica que aún se rebasan los estándares de la NOM, U.S. EPA y las guías de la OMS. En la **Tabla I.6** se presenta la comparación de los valores máximos por ZMCM, CDMX y Estado de México con el cumplimiento de los límites antes mencionados y en la **Figura I.5** se puede observar el detalle por estación de monitoreo. En ambas entidades federativas de la ZMCM se rebasa la norma de PM_{10}, sin embargo, es notable que en el Estado de México se presentan los valores máximos de PM_{10} en estaciones como Xalostoc (XAL) y La Presa (LPR), esto es debido a la cantidad de industrias y tránsito vehicular en el norte de la zona metropolitana, mientras que, en la Ciudad de México, las estaciones con valores máximos son Merced (MER) y UAM Iztapalapa (UIZ). Los sitios de monitoreo que cumplieron con el estándar de la NOM en 2018 fueron Pedregal (PED) y Lomas (LOM), ambas dentro de la Ciudad de México y ubicadas al suroeste de la zona metropolitana. Al comparar los indicadores internacionales se observa que el valor de las guías de la OMS se rebasa en toda la ZMCM y, por el contrario, el estándar de la U.S. EPA se cumple en todas las estaciones de la zona metropolitana.

Tabla I.6. Comparación de datos de concentración máxima de PM_{10} con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, el estándar de la U.S. EPA y los valores guía OMS.

	NOM		OMS		U.S. EPA
	Máximo 24 h	**Promedio anual**	**Percentil 99 24 h**	**Promedio anual**	**Promedio trianual del 2.º máximo 24 h**
	75 µg/m³	**40 µg/m³**	**50 µg/m³**	**20 µg/m³**	**150 µg/m³**
ZMCM	182 µg/m³	70 µg/m³	182 µg/m³	70 µg/m³	133 µg/m³
Ciudad de México	103 µg/m³	48 µg/m³	103 µg/m³	48 µg/m³	91 µg/m³
Estado de México	182 µg/m³	70 µg/m³	182 µg/m³	70 µg/m³	133 µg/m³

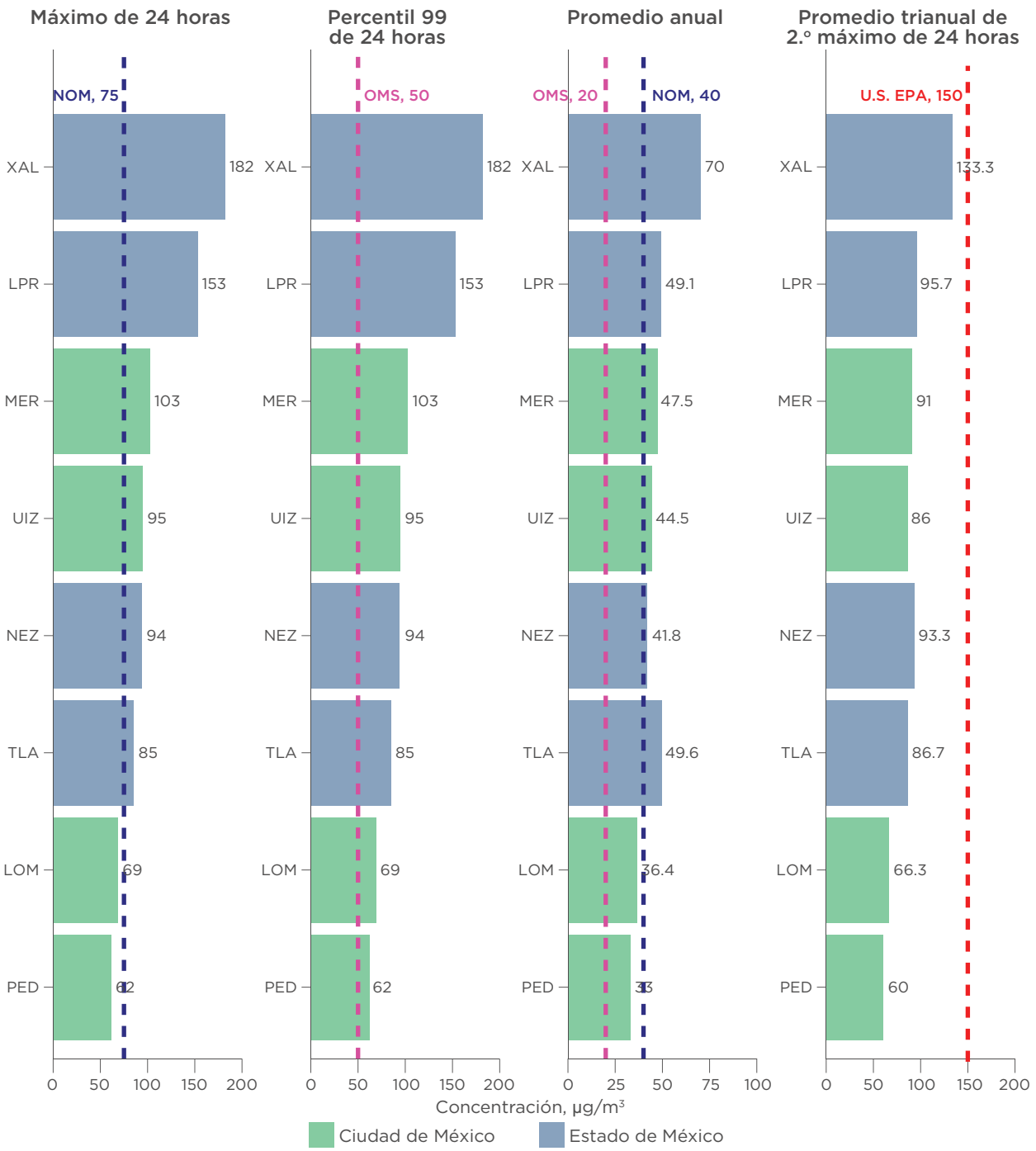


Figura I.5. Evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014, guías OMS y estándar de la U.S. EPA de PM_{10} por estación. Presenta el valor máximo del promedio móvil de 24 horas, Percentil 99 de 24 horas, promedio anual y promedio trianual de 24 horas. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS, la línea roja indica el estándar de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)

La concentración de partículas $PM_{2.5}$ tiene un comportamiento similar a las PM_{10}, durante el año es uno de los contaminantes con mayor número de días con mala calidad del aire, especialmente en la temporada seca fría.

Las $PM_{2.5}$ es la fracción de partículas con mayor importancia en cuestión de impacto en la salud, debido a que ingresan al sistema respiratorio profundo, en consecuencia, este contaminante tiene afectaciones a corto y largo plazo, por lo que es necesario realizar la evaluación del cumplimiento de la normatividad mexicana e internacional de $PM_{2.5}$. En 2018, se observó que los valores máximos de concentración del contaminante rebasaron los estándares de la NOM, U.S. EPA y las guías de la OMS (**Tabla I.7**). En el desglose por estación de monitoreo se encontró que las estaciones que cumplieron con el indicador de 24 h de la NOM fueron San Agustín (SAG) y Pedregal (PED), sin embargo, ninguna cumple con el indicador del promedio anual de la NOM y la guía de la OMS. El valor máximo de concentración de los indicadores de 24 h y anual se presentó en Xalostoc (XAL) al noreste de la ZMCM, en el Estado de México (**Figura I.6**).

Tabla I.7. Comparación de datos de concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, el estándar de la U.S. EPA y los valores guía OMS.

	NOM		OMS		U.S. EPA	
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2.º máximo 24 h	Promedio trianual
	45 µg/m³	12 µg/m³	25 µg/m³	10 µg/m³	35 µg/m³	12 µg/m³
ZMCM	70 µg/m³	27.7 µg/m³	70 µg/m³	27.7 µg/m³	57 µg/m³	27 µg/m³
Ciudad de México	58 µg/m³	23.2 µg/m³	58 µg/m³	23.2 µg/m³	44 µg/m³	23 µg/m³
Estado de México	70 µg/m³	27.7 µg/m³	70 µg/m³	27.7 µg/m³	57 µg/m³	27 µg/m³

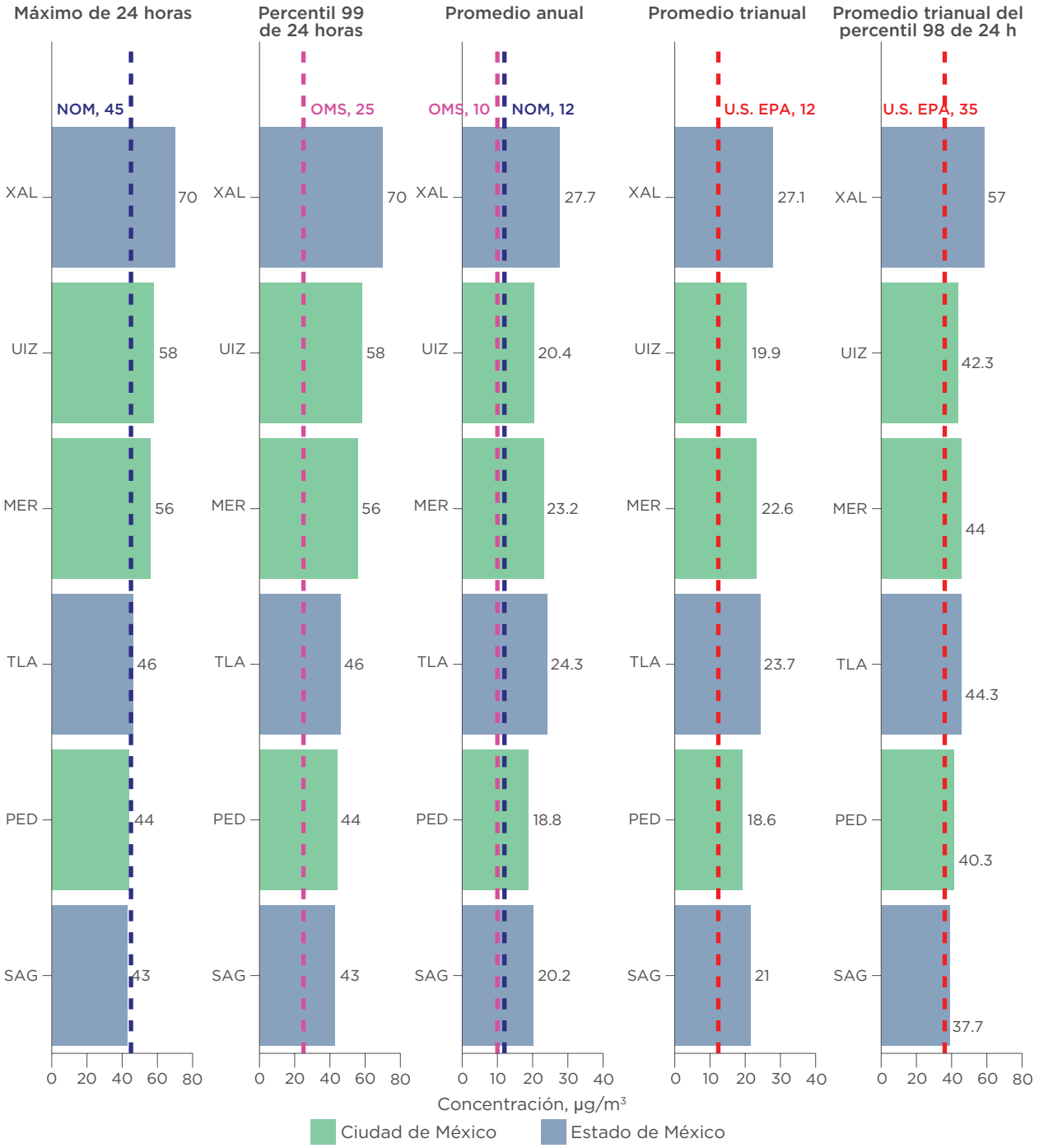


Figura I.6. Evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014, guías OMS y estándar de la U.S. EPA de $PM_{2.5}$ por estación. Presenta el valor máximo del promedio móvil de 24 horas, Percentil 99 de 24 horas, promedio anual, promedio trianual y del promedio trianual del percentil 98 de 24 horas. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS, la línea roja indica el estándar de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

Plomo (Pb)

El plomo es un metal tóxico y bioacumulable, es decir, una sustancia que se acumula en tejidos y órganos, afecta diversos sistemas del cuerpo como el nervioso, hematológico, gastrointestinal, cardiovascular y renal. Los niños son más vulnerables a los efectos neurotóxicos del plomo ya que un nivel bajo de exposición puede causar daños neurológicos graves y en algunos casos, irreversibles (OMS, 2019). La vía de exposición al plomo puede ser por inhalación de partículas de polvo generadas por la combustión de materiales que contienen este metal o mediante la ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados.

En México, actualmente una de las principales fuentes de contaminación ambiental de este metal es por la explotación minera con un total de 240,304 toneladas de Pb, la producción de plomo se lleva a cabo principalmente en Zacatecas, Chihuahua y Durango como los mayores productores de dicho metal (Cámara Minera de México, 2019). En la Ciudad de México, la presencia de plomo en el aire ambiente estuvo asociada al consumo de gasolinas con plomo, sin embargo, este combustible fue retirado en la década de 1990 y la concentración del metal disminuyó considerablemente. En la actualidad, la presencia de plomo en el aire ambiente se relaciona con la resuspensión del material remanente en el suelo, la actividad industrial, así como en el uso de algunas pinturas y pigmentos (SEDEMA, 2018a).

La determinación de plomo se realiza con el muestreo de las partículas suspendidas totales (PST), a pesar de que fue derogada la NOM sobre la determinación de las PST en el aire ambiente, el SIMAT continúa con el muestreo de este contaminante para determinar el plomo, como lo especifica la NOM-026-SSA1-1993 de salud ambiental sobre los valores límites permisibles para el plomo (1.5 µg/m³ máximo promedio trimestral). En la ZMCM, desde 1993 la concentración de plomo no rebasa el valor límite normado y la última información con la que cuenta el SIMAT del año 2017 indica que el máximo del promedio trimestral se registró en la estación Xalostoc (XAL), ubicada en el Estado de México con 0.038 µg/m³ mientras que en la Ciudad de México el valor máximo se registró en la estación Merced (MER) con 0.032 µg/m³.

Al comparar los valores máximos de concentración registrados en la Ciudad de México con respecto a los valores guía de la OMS y el estándar de los Estados Unidos (U.S. EPA), muestra que no se rebasan (**Tabla I.8 y Figura I.7**). A pesar de que no se excede ningún valor límite de los estándares nacionales e internacionales, es importante continuar con el muestreo y determinación de plomo debido a la relevancia y el impacto en la salud de la población a corto, mediano y largo plazo.

Tabla I.8. Comparación de datos de concentración máxima de Pb con respecto a los valores límite de la NOM-026-SSA1-1993, el estándar de la U.S. EPA y el valor guía OMS para 2017.

	NOM	OMS	U.S. EPA
	Máximo promedio trimestral	**Promedio anual**	**Máximo promedio trimestral en tres años**
	1.5 µg/m³	**0.5 µg/m³**	**0.15 µg/m³**
ZMCM	0.038 µg/m³	0.27 µg/m³	0.054 µg/m³
Ciudad de México	0.032 µg/m³	0.21 µg/m³	0.033 µg/m³
Estado de México	0.038 µg/m³	0.27 µg/m³	0.054 µg/m³

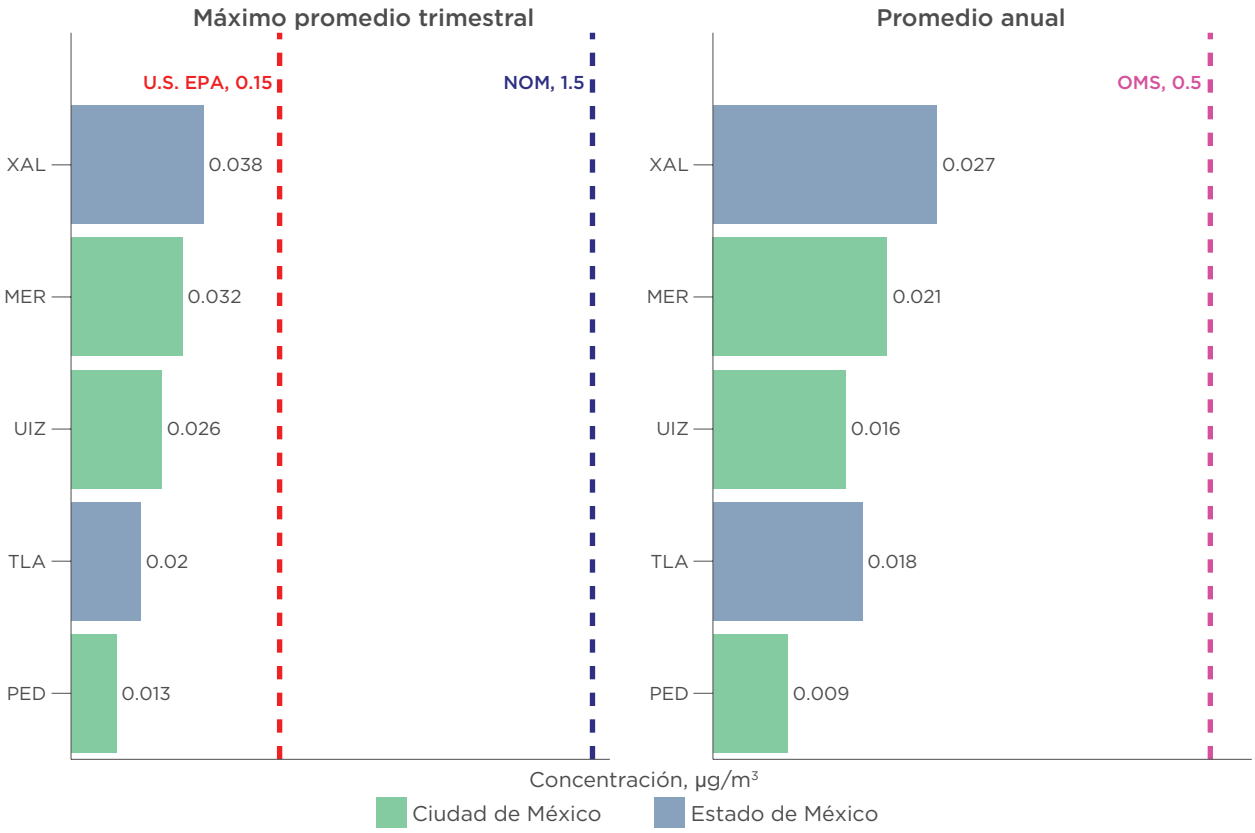


Figura I.7. Evaluación del cumplimiento de la NOM-026-SSA1-1993, valores guía de la OMS y estándar de la US EPA de Pb por estación. Presenta el máximo del promedio trimestral y del promedio anual. El color verde de la barra corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las azules en los municipios conurbados del Estado de México. La línea punteada rosa indica el valor límite de la OMS, la línea roja es el valor que corresponde al límite de la U.S. EPA y el valor límite de la NOM en azul.

2

EL TIEMPO. COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

Temperatura

La temperatura promedio anual en la ZMCM fue de 16.7 °C y se estimó a partir de los datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), este valor anual fue 0.1 °C menor que el registrado en 2017. El promedio mensual de temperatura muestra que, en 2018, el mes más frío fue enero con un valor promedio de 12.5 °C, mientras que el más cálido fue mayo con un promedio de 19.4 °C **(Figura II.1)**.

El análisis del promedio diario registra el mínimo el 14 de noviembre, este patrón de disminución de temperatura se presentó en diversas estaciones de monitoreo y se debió a la entrada del Frente Frío No. 10 (12 – 15 de noviembre) el cual afectó gran parte del país porque fue el más intenso del mes y provocó bajas temperaturas en diversos estados. De acuerdo con el reporte del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la masa de aire frío ingresó por el norte del país desde el día 12 de noviembre y se trasladó hacia el sureste, en consecuencia, se presentaron fuertes rachas de viento y caída de agua-nieve en zonas altas de Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Coahuila, Veracruz, Puebla, Hidalgo, Estado de México y Ciudad de México (SMN, 2018b). El máximo del promedio horario de 2018 fue de 32.8 °C registrado el 31 de mayo a las 12:00 h en la estación Montecillo (MON), en el municipio de Texcoco, Estado de México y el valor mínimo de -6.2 °C, en la estación Ajusco (AJU) al sur, ubicada en la alcaldía de Tlalpan en la Ciudad de México, este valor fue registrado el 15 de enero a las 5:00 h.

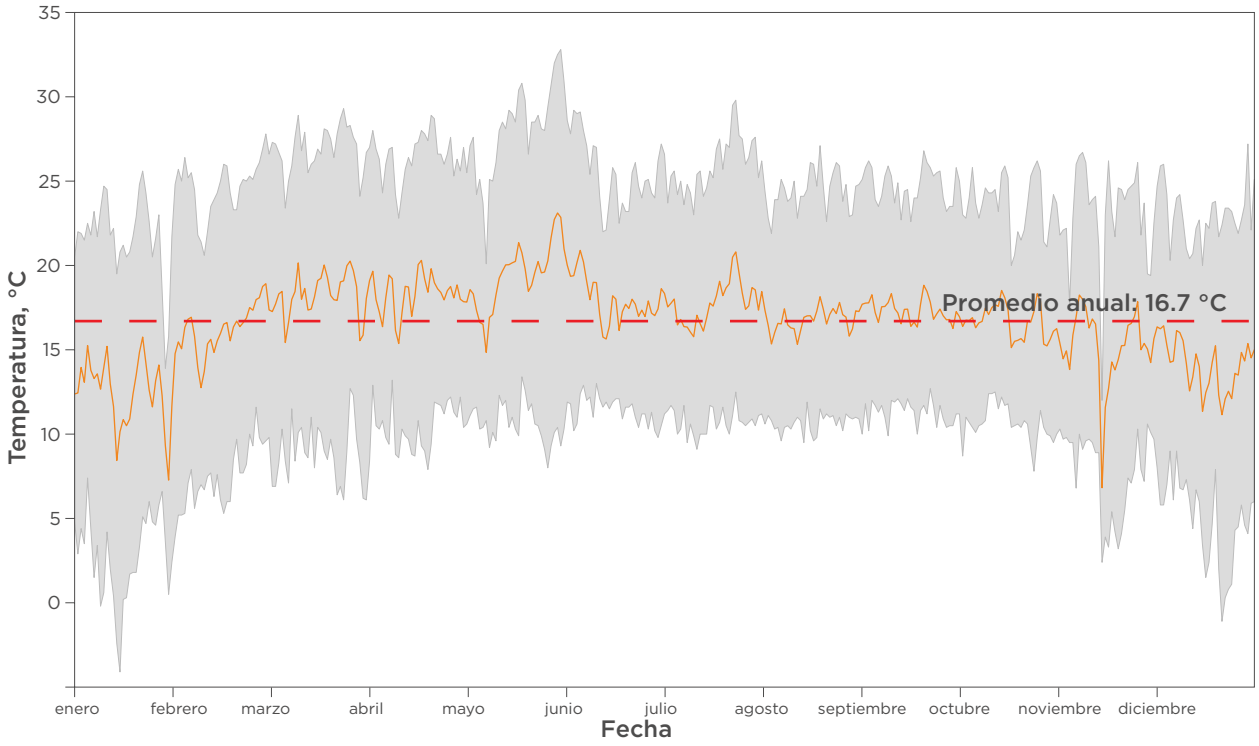


Figura II.1. Serie de tiempo del promedio diario de la temperatura ambiente en la ZMCM durante 2018, la línea naranja corresponde al promedio diario mientras que el área sombreada en gris indica los valores máximos y mínimos diarios.

En la **Figura II.2** se presenta el análisis de anomalías de temperatura durante 2018, esto se realizó con base en el promedio mensual histórico que considera el periodo 2000 al 2017. Las anomalías negativas en temperatura se observaron en los meses de enero, abril y agosto; con un valor mínimo de -1.0 °C en enero. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional durante enero del 2018, la presencia de sistemas anticiclónicos sobre la región noroeste del país, ocasionaron que los sistemas frontales se desplazaran sobre la vertiente del Golfo de México, lo que ocasionó que se observaran temperaturas por debajo del promedio histórico de 1981-2010, en consecuencia, la Ciudad de México registró un enero más frío.

En el mes de abril también se registró una anomalía negativa de temperatura (-0.5 °C), esto debido a que se presentaron siete sistemas frontales, dos más que en el promedio mensual histórico (2000 – 2017), lo cual favoreció el descenso de las temperaturas ocasionado por el desplazamiento de la masa de aire polar que acompaña al anticiclón de origen continental. En este mes, la Ciudad de México fue afectada por los frentes fríos número 43 (7-11 de abril), 44 (12-15 de abril) y 46 (19-25 de abril). El resto de los meses del 2018 presentaron valores positivos en la anomalía de temperatura (significa que la temperatura estuvo por arriba de los datos históricos) y en marzo se registró la mayor diferencia (1.4 °C) en el promedio mensual con respecto a la media histórica. La anomalía de temperatura media durante marzo fue la tercera más alta que se ha observado desde 1971, mientras que el máximo histórico en la anomalía de temperatura se registró en 2011.

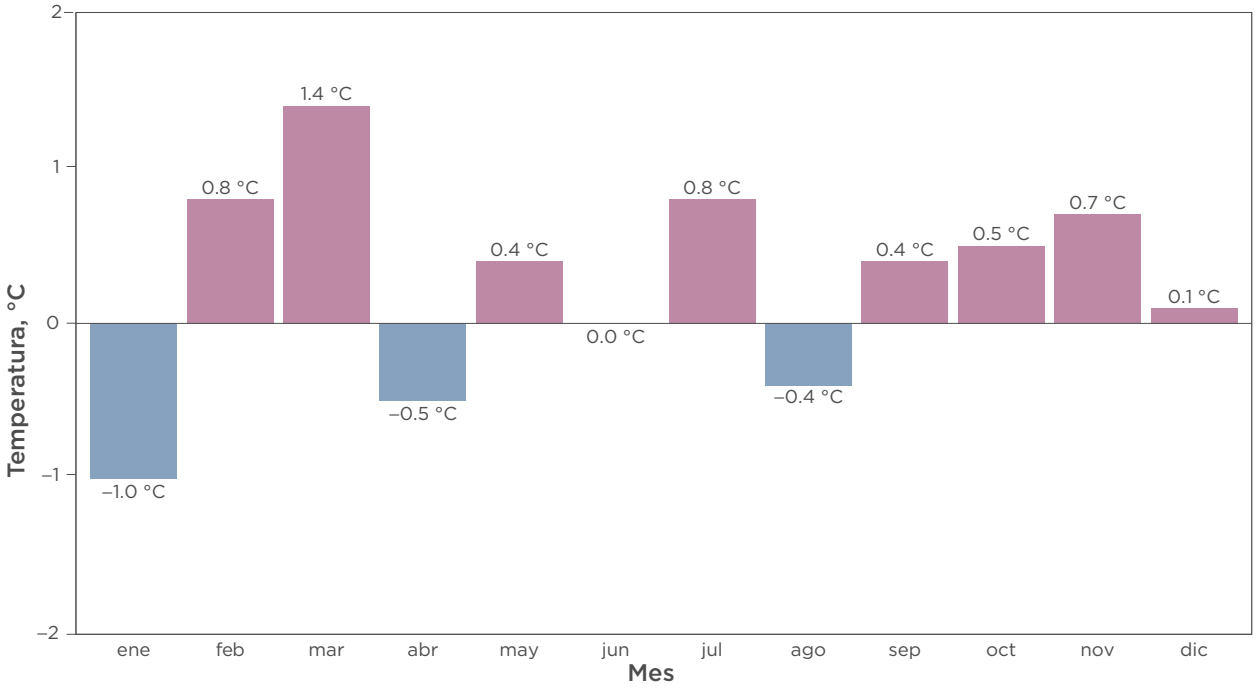


Figura II.2. Anomalía de temperatura en la ZMCM para 2018: diferencia entre la temperatura promedio mensual de 2018 con respecto a la temperatura promedio histórica (2000 a 2017). Los valores corresponden a la diferencia de la temperatura en °C. En la construcción del gráfico se emplearon los datos históricos de las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

El comportamiento de la temperatura se relaciona directamente con los fenómenos globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y de acuerdo con la información de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés), durante el 2018, el comportamiento del sistema océano-atmósfera favoreció condiciones para La Niña durante el mes de enero, sin embargo, se debilitó en los siguientes dos meses y evolucionó a condiciones "Neutrales" para el resto del año. En consecuencia, se reportaron cinco frentes fríos en enero, dos menos que la media histórica para este mes.

En el comportamiento de la temperatura global en el año 2018 (**Figura II.3**), se puede observar que se presentó una anomalía positiva de temperatura en la mayor parte del mundo, en el caso de México la diferencia con el promedio climatológico fue de hasta 1 °C. Este año fue el cuarto año más cálido en la Tierra desde 1981, sin embargo, la temperatura media global fue menor que en 2015, 2016 y 2017.

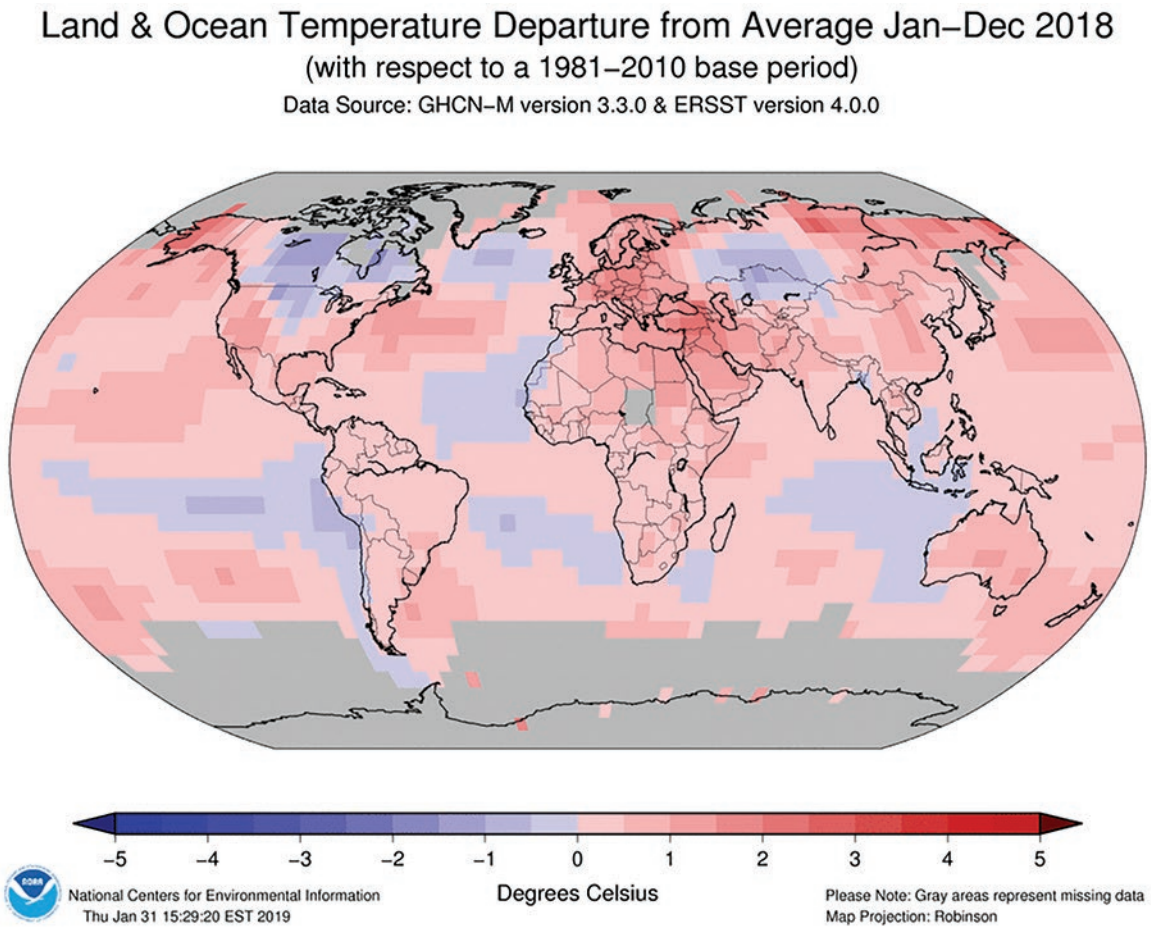


Figura II.3. Anomalía de la temperatura global durante 2018. La imagen muestra la desviación promedio de la temperatura de la Tierra y el océano durante 2018, con respecto al promedio entre 1981 a 2010. Imagen tomada de la NOAA (https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/global-maps/201813, consultado el 21 de octubre de 2019).

Humedad Relativa

Este año se caracterizó por un transporte de humedad relacionado con un flujo proveniente de la región este del país, lo que fue ocasionado por los sistemas tropicales que se desplazaron desde el Atlántico, las ondas tropicales y vaguadas sobre el Golfo de México; pero principalmente debido a los ciclones tropicales que se formaron en el Pacífico Ecuatorial durante la temporada ciclónica; así como la influencia de la vaguada de Norteamérica.

El análisis de la serie de tiempo de los promedios diarios de humedad relativa (% HR) en la ZMCM muestra un ambiente relativamente seco en la primera parte del 2018. El promedio anual registrado fue de 57.1 %, el cual es superior en tres unidades con respecto al año 2017. Se observó que, durante la temporada de lluvias (junio a octubre), la humedad relativa fue mayor que en el resto del año, lo que coincide con el comportamiento característico de la temporada (**Figura II.4**). Sin embargo, en el mes de mayo se presentó un valor mensual por debajo del promedio histórico (2000 - 2017) con una anomalía de -2.3 %, esto fue ocasionado por un evento atípico en altos niveles de geopotencial (500 hPa), que favoreció, a nivel sinóptico, movimientos descendentes y flujo seco del noroeste.

El análisis del promedio anual de humedad relativa por estación de REDMET, indicó el valor máximo (69 %) en la estación del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), seguido por la estación Cuautitlán (CUT) que registró 66.8 %, ambas ubicadas en la periferia de la Ciudad de México y se encuentran rodeadas de vegetación, esto es un factor importante para el aumento de humedad relativa. El valor mínimo fue 50.8 % en las estaciones Miguel Hidalgo (MGH) y Hospital General México (HGM), localizadas en la zona urbana.

El periodo del año con valores mínimos del promedio mensual fue el trimestre de marzo a mayo, con un valor de 43.0 % en marzo; mientras que los meses entre agosto y octubre presentaron los máximos de humedad con valores superiores al 68 %, el más alto se registró en agosto con 68.9 %; esto fue debido a la advección de humedad desde el Golfo de México, al desplazamiento de ondas tropicales y por la formación de ciclones tropicales en la cuenca del Pacífico.

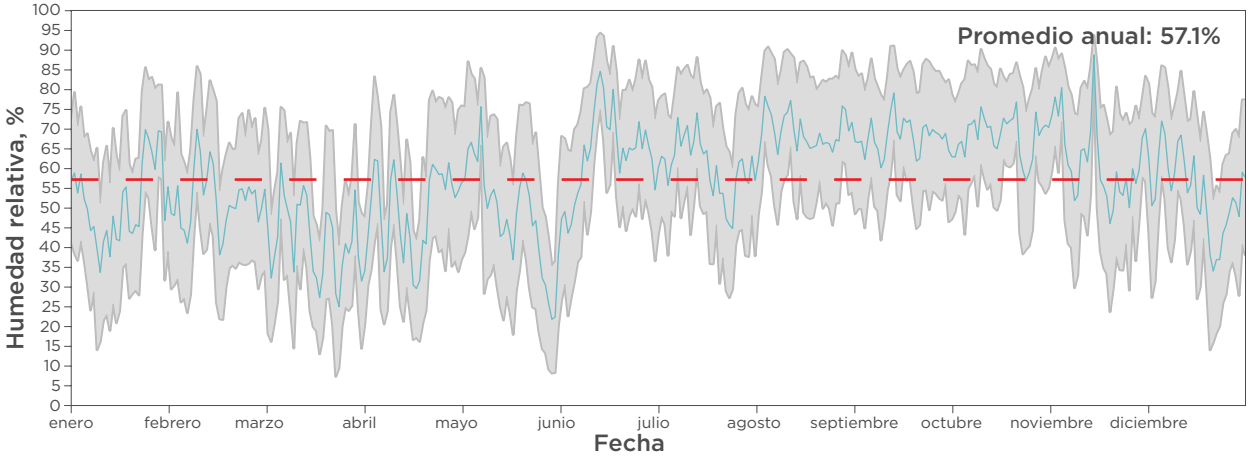


Figura II.4. Serie de tiempo del promedio diario de la humedad relativa en la ZMCM durante 2018. La línea azul corresponde al promedio diario, mientras que el área sombreada en gris es la desviación estándar.

Precipitación pluvial

La ZMCM se caracteriza por tener una temporada de lluvia que normalmente comprende los meses de junio a septiembre; aunque en ocasiones se presenta desde finales de mayo hasta octubre.

En 2018, el periodo de lluvias estuvo influenciado por la fase neutra de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en el Pacífico Ecuatorial, así como los patrones de circulación, temperatura y precipitación se asociaron en mayor medida a las condiciones atmosféricas y oceánicas observadas en el Pacífico Tropical (MJO), como el comportamiento de la Oscilación del Ártico (AO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), todos estos factores dieron como resultado que la precipitación fuera por debajo del promedio histórico (1995-2017).

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2018b), reportó para la Ciudad de México un promedio de precipitación acumulada anual de 786.2 mm. El mes con el valor máximo fue agosto con 198.2 mm, mientras que el mínimo acumulado fue en diciembre con 4.8 mm (**Figura II.5**). Durante el mes de agosto la combinación, de las oscilaciones antes mencionadas (AO, NAO) y las condiciones en latitudes medias en el Pacífico Oriental, favoreció la presencia de varios ciclones tropicales en el norte de la República Mexicana, adicionalmente se presentó una interacción con la corriente en chorro subtropical, esto ocasionó la entrada de humedad hacia la región de Norteamérica. Así mismo, se presentaron 14 ondas tropicales sobre la región del Atlántico y el Pacífico Noreste. El SMN, cuantificó 11 ondas tropicales durante agosto, las cuales fueron tres más que el promedio de precipitación histórico (1995-2017), ya que el número máximo registrado para un mes de agosto fue en 2003 con 12 ondas tropicales.

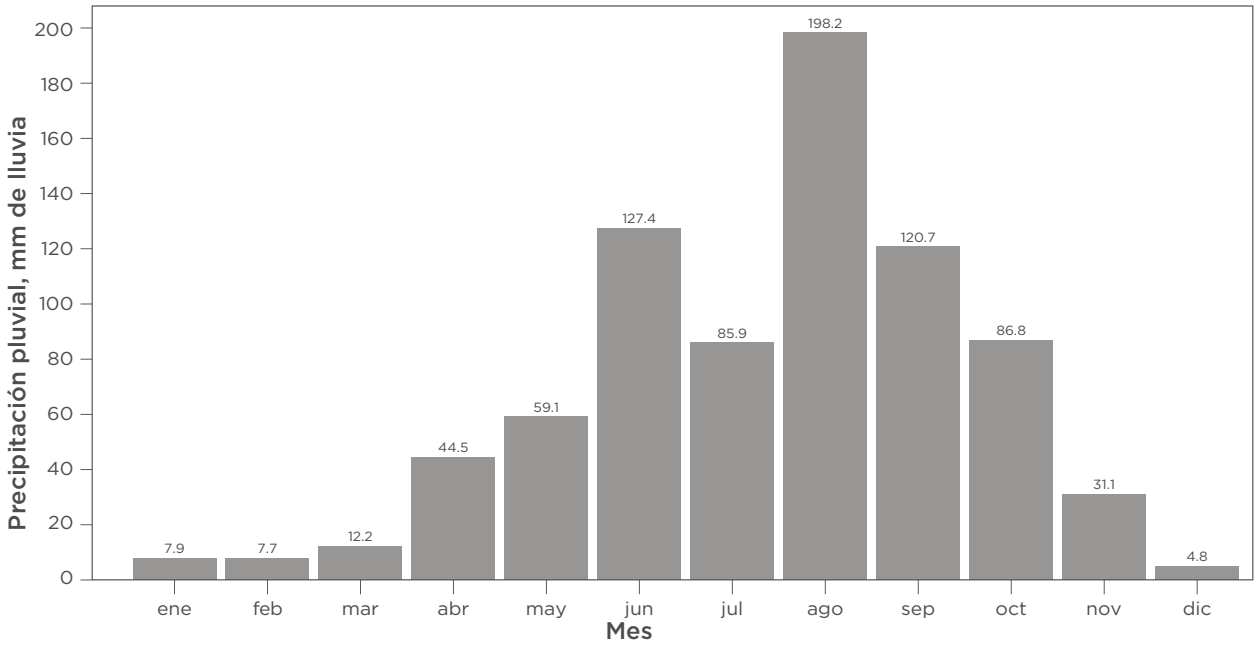


Figura II.5. Precipitación acumulada por mes del 2018 para la Ciudad de México (Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2018a).

Por otra parte, las alcaldías que reportaron los mayores acumulados de lluvia en la Ciudad de México de acuerdo con la **Figura II.6**, fueron Magdalena Contreras y Cuajimalpa con 458 mm y 452 mm, respectivamente, que se encuentran al poniente de la Ciudad de México en la zona boscosa. El valor mínimo ocurrió en Venustiano Carranza con 202 mm.

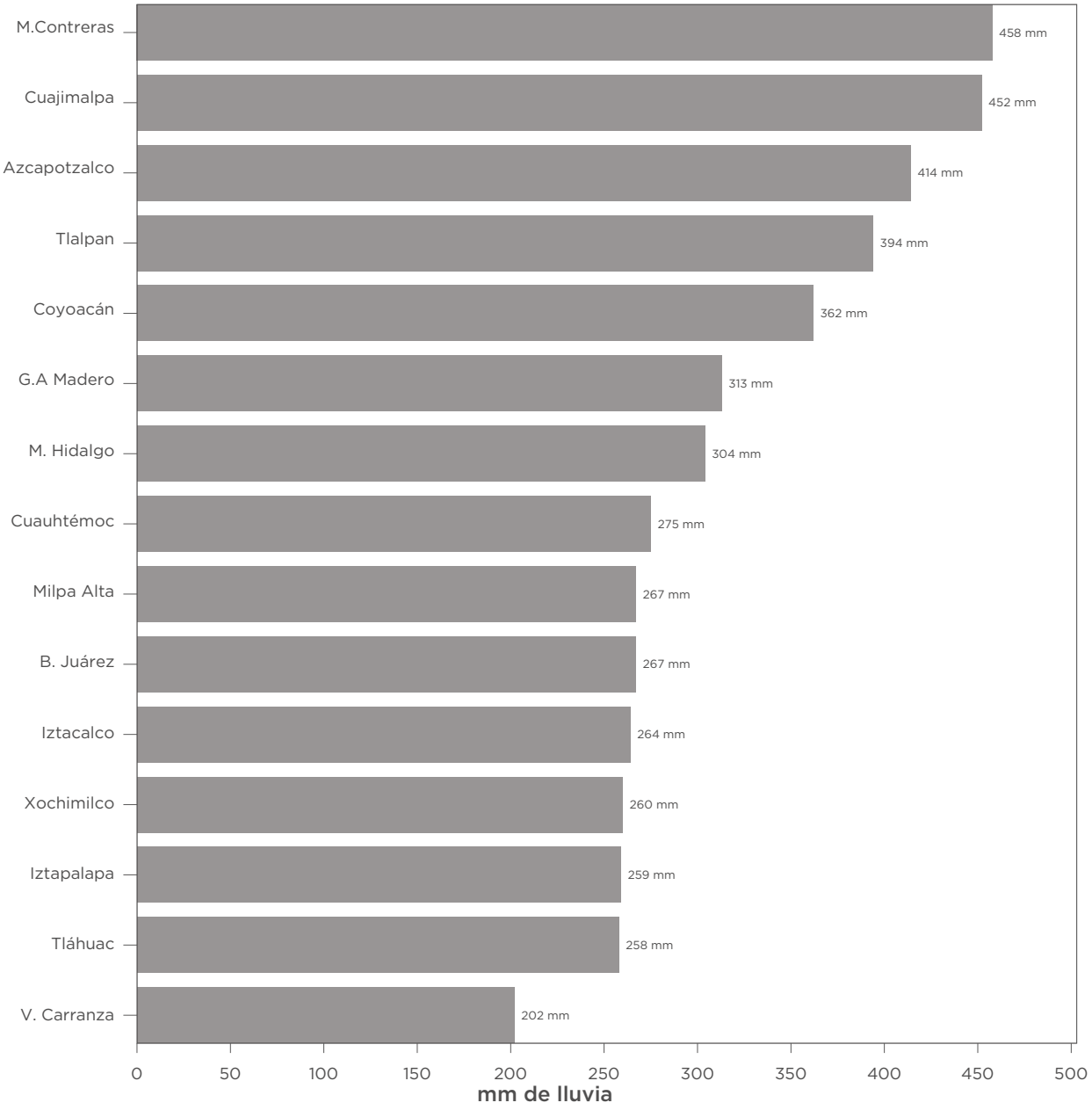


Figura II.6. Precipitación acumulada por alcaldía de la Ciudad de México durante 2018 (Datos proporcionados por SACMEX).

Presión barométrica

La Ciudad de México se encuentra a 2,240 msnm, por lo que su atmósfera tiene menos masa que al nivel del mar, lo cual se estima en aproximadamente 23 % menos. Tanto a escala sinóptica (sistemas > 100 km) como a mesoescala (fenómenos < 100 km), las variaciones de presión son responsables del movimiento del viento; por lo que su estudio es de gran utilidad para el pronóstico, a corto plazo, de las condiciones meteorológicas y de la calidad del aire.

Las condiciones de cielos despejados se asocian a sistemas de alta presión o anticiclones, por el contrario, las lluvias y tormentas, están directamente relacionadas con sistemas de baja presión o ciclónicos, como pueden ser las ondas tropicales o disturbios ciclónicos; sin embargo, no son los únicos sistemas de baja presión que influyen sobre la cuenca de la Ciudad de México.

El impacto de sistemas de alta presión barométrica o atmosférica sobre la Ciudad de México ocasiona episodios de alta concentración de contaminantes debido a que los sistemas anticiclónicos generan condiciones atmosféricas estables y movimientos descendentes de aire que impiden la dispersión. Normalmente están asociados a cielos despejados lo cual favorece el incremento de temperatura, radiación solar y la formación de compuestos fotoquímicos como el ozono.

Por el contrario, la influencia de sistemas de baja presión favorece la frecuencia e intensidad de lluvias que contribuye al lavado atmosférico, a través del arrastre de contaminantes. Adicionalmente se presentan cielos nublados que reducen, de manera importante, la radiación solar y se registra temperatura baja, por lo que se inhibe la producción de compuestos fotoquímicos y el estancamiento de la contaminación.

En el año 2018, el promedio de la presión atmosférica a nivel de la cuenca de la Ciudad de México fue de 584.9 mmHg y en comparación con 2017, la presión registró una reducción de 0.1 mmHg. En la **Figura II.7** se presenta la serie

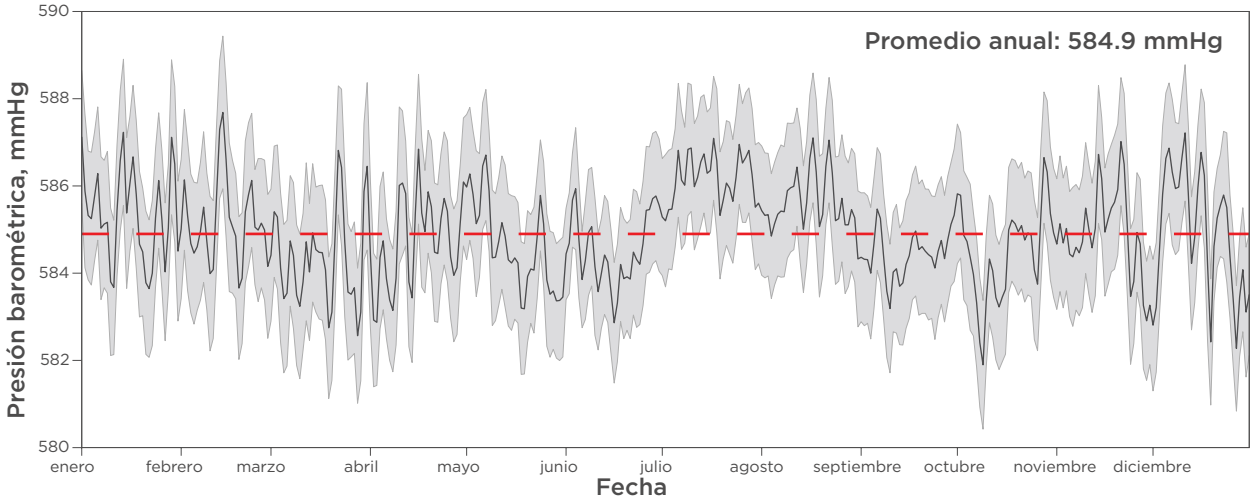


Figura II.7. Serie de tiempo del promedio diario de la presión barométrica en la ZMCM. La línea continua corresponde al promedio diario de todas las estaciones, mientras que el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

de tiempo de la presión en las estaciones ubicadas dentro de la cuenca, donde puede observar que, 2018 reportó un descenso en la presión durante tres periodos en el año, el primero se presentó de finales de febrero hasta mediados de abril, después se registró otro en la mitad de mayo hasta mediados de junio, finalmente, un episodio en septiembre y octubre. Estos mínimos de presión usualmente están relacionados con un incremento en la velocidad del viento y presencia de lluvias, lo que es congruente con el periodo del año en el que se presentó.

El valor mínimo de presión registrado en 2018 se observó el 19 de diciembre a las 14:00 h en la estación del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), al suroeste de la ZMCM, con 527 mmHg. Mientras que los meses con valores altos de presión se presentaron en la primera parte del año, de enero a finales de febrero, además se observa un notable aumento de la presión durante julio y agosto. El valor máximo registrado en 2018 fue de 591 mmHg y se observó el 14 de enero a las 09:00 h en la estación Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), al noroeste de la ZMCM.

Viento

En la ZMCM, el comportamiento de los patrones de viento, así como su velocidad y dirección, son factores determinantes para la calidad del aire durante el año, debido a que, en presencia de velocidad de viento fuerte, se favorece la dispersión de contaminantes, por el contrario cuando existen vientos débiles, esto propicia mala calidad del aire debido a la acumulación de contaminantes.

La serie de tiempo para el promedio diario de la velocidad de viento para las estaciones de REDMET muestra que el promedio anual fue 2.0 m/s, muy similar a los promedios anuales de 2017 y 2016. En el análisis del promedio mensual se observó que en mayo se presentó el máximo con 2.3 m/s, mientras que el valor mínimo de velocidad se registró en septiembre y diciembre ambos con 1.8 m/s. Las estaciones Ajusco Medio (AJM) y Milpa Alta (MPA), registraron el promedio máximo con 2.7 m/s; mientras el mínimo fue 1.4 m/s y se registró en la estación San Agustín (SAG), en el Municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México.

Durante abril, mayo e inicios de junio se presentaron valores altos de velocidad de viento, lo que favoreció la dispersión de contaminantes durante la temporada de ozono y propició que el impacto de mala calidad del aire disminuyera considerablemente.

Generalmente, la velocidad del viento que registran las estaciones del SIMAT presenta un patrón de viento débil durante la madrugada, este se incrementa gradualmente desde las 8:00 h hasta presentar el máximo a las 18:00 h; y disminuye durante la noche. En la **Figura II.9** se presenta el patrón del 2018 para tres horarios del día: matutino (7:00 - 14:00 h), vespertino (15:00 – 20:00 h) y nocturno (21:00 – 6:00 h). La velocidad de viento durante el horario matutino presentó viento débil, principalmente en la zona centro, mientras que en el sur se observa una velocidad de viento mayor, esto debido al efecto de los patrones de viento en las zonas montañosas. En el horario vespertino se observa un aumento notable en la velocidad de viento y la dirección de viento predominante es del norte y noreste, finalmente el patrón de vientos nocturnos indica una disminución en la velocidad y se puede observar el flujo montaña-valle, el cual traslada las masas de aire más frías de la montaña hacia el valle de la Ciudad de México.

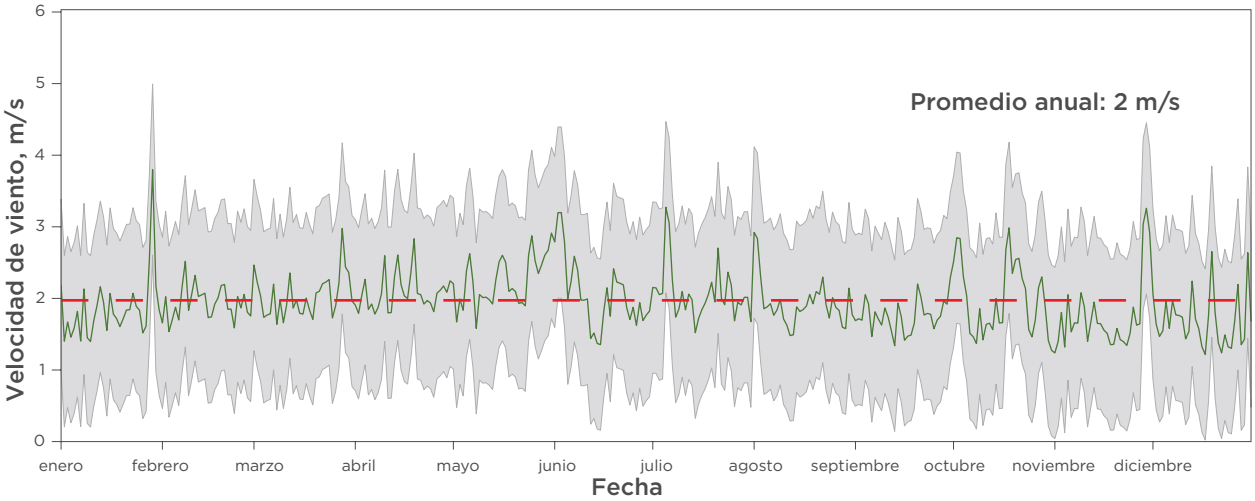


Figura II.8. Serie de tiempo del promedio diario de velocidad de viento en la ZMCM para 2018. La línea verde indica el promedio diario, mientras que el área sombreada en gris indica la desviación estándar.

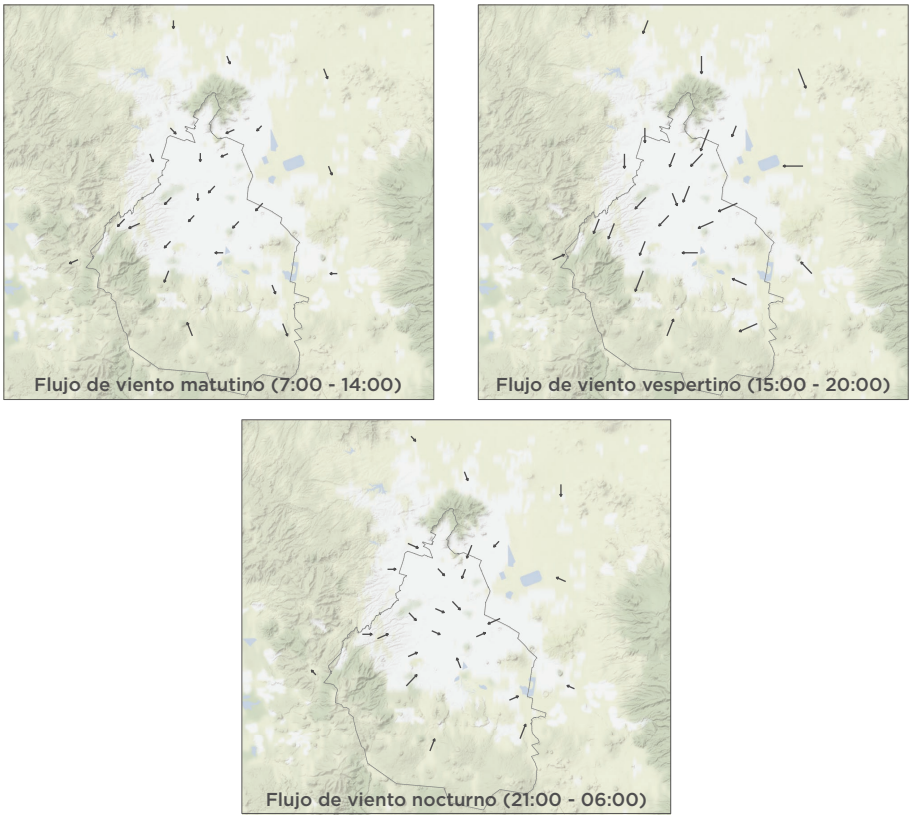


Figura II.9. Campo promedio del flujo de viento para los horarios matutino, vespertino y nocturno durante 2018. Cada vector representa el flujo medio durante el año para cada una de las estaciones.

El flujo de viento a nivel de superficie presenta además de una variación diurna, una variación mensual o estacional; también está relacionada con los fenómenos regionales y de escala sinóptica. La meteorología de escala sinóptica presenta dos patrones durante el año, uno entre noviembre y abril con un flujo seco del oeste, asociado a condiciones anticiclónicas; y durante el resto de los meses, se presenta un flujo con mayor humedad proveniente de la zona este que es causado por los Alisios. Dichos flujos son fortalecidos por los centros de acción permanente de la atmósfera, como son la Oscilación del Atlántico Norte o Anticiclón Subtropical del Atlántico; el anticiclón del Pacífico Subtropical y la Oscilación del Ártico; así como por sistemas océano-atmósfera como es el ENOS.

En 2018, durante los meses de febrero a junio, el comportamiento del viento fue el típico de esta época que durante el día, predominan vientos débiles provenientes del norte debido al flujo, a nivel sinóptico, de oeste al norte y que estuvo influenciado por la presencia de sistemas anticiclónicos semi-estacionarios sobre el Pacífico y noroeste del territorio nacional. En mayo los valores de altura de geopotencial se mantuvieron por arriba del promedio en el occidente del país, lo que favoreció temperaturas más cálidas y un nivel de precipitación por debajo del promedio en los estados al Oeste del país.

El mes de junio marca el inicio climatológico del verano, en esta época del año el calentamiento radiativo aumenta, por lo que las masas de aire que eventualmente ingresan al país disminuyen en intensidad y el vórtice polar se contrae lo que mantiene la corriente de chorro en latitudes altas. Durante los meses de julio a septiembre predominaron los vientos del norte, que alcanzaron máximos tras la influencia de los ciclones tropicales que se desplazaron al sur del territorio. En agosto la interacción del huracán John y la tormenta tropical Ileana (5-10 de agosto) provocaron el incremento de la velocidad del viento y el transporte de humedad con lluvias asociadas. En octubre con la llegada de los primeros frentes fríos se incrementó la velocidad del viento en la zona norte, en este mes se contabilizaron cinco frentes fríos, uno más que la climatología; además la presencia de ciclones tropicales sobre el Pacífico también incrementó los gradientes de presión y por lo tanto aumentó la velocidad del viento. En noviembre se observó una disminución notable en la velocidad del viento, sin embargo, se presentó un evento entre los días 25 al 28 debido al paso del Frente Frío No.12, que provocó un evento de "Norte" sobre la vertiente del Golfo de México y el día 28 se reportó el máximo horario de velocidad de viento en la estación Ajusco Medio (AJM) con 12.5 m/s.

En el análisis de los campos de viento promedio para los diferentes meses (**Figura II.10**) se puede observar que durante la mayor parte del año (enero a octubre), la dirección del viento predominante es del norte y noreste, sin embargo, si se presentan algunas corrientes del sur, lo cual es más notorio en los meses de enero – abril, dicha situación crea zonas de convergencia de vientos en el centro y sur de la ZMCM. En la parte final del año, en los meses de noviembre y diciembre, la dirección de viento predominante es del sur y sureste, lo que conlleva a la formación de zonas de convergencia de vientos en el centro y norte de la ZMCM.

Radiación solar

La luz solar es esencial para la vida, una exposición moderada a la radiación solar ultravioleta (UV) contribuye a la síntesis de vitamina D, sin embargo, la exposición prolongada puede provocar efectos negativos en la salud humana. La

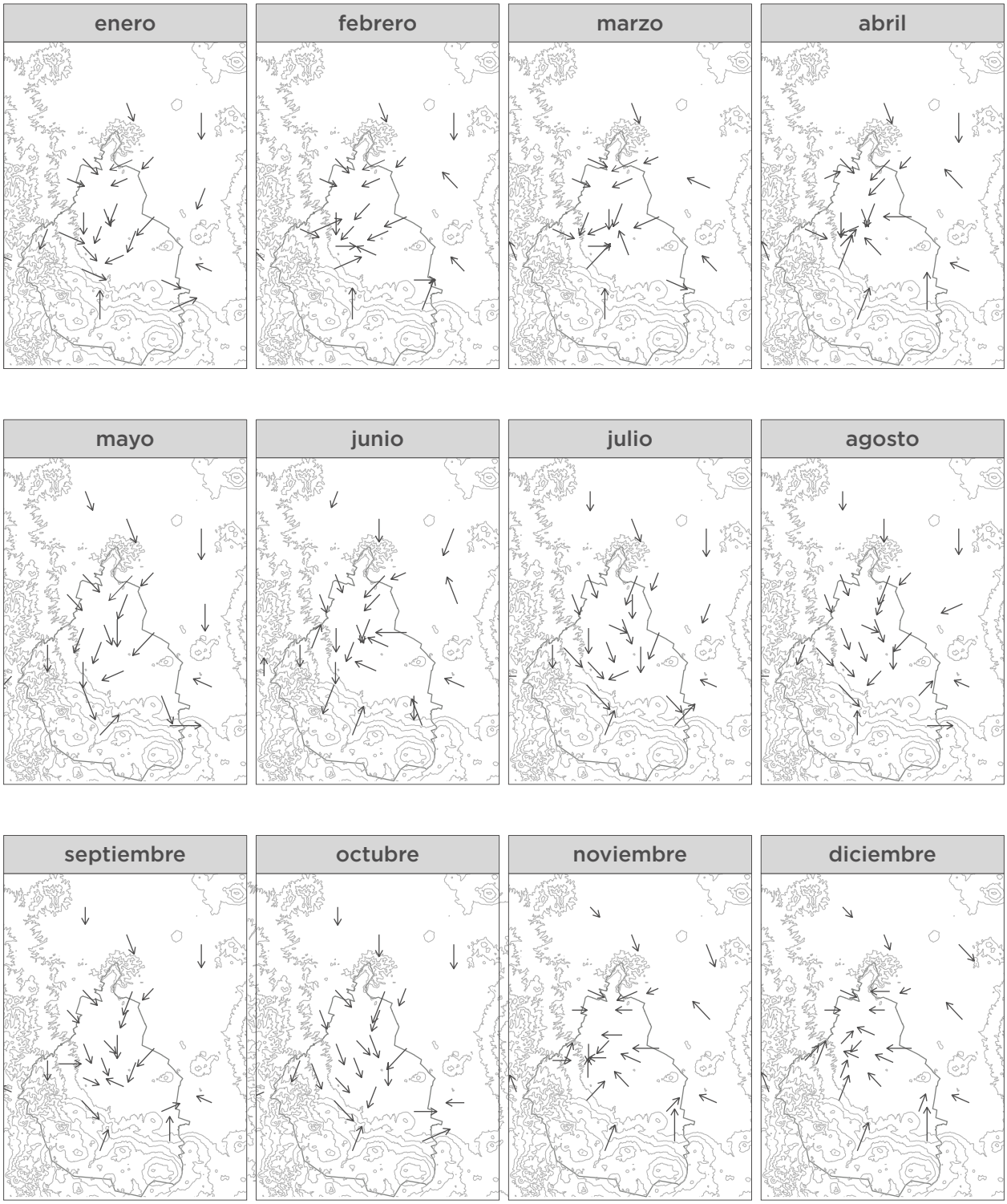


Figura II.10. Campo mensual del flujo del viento promedio para la ZMCM. Cada vector representa el flujo medio mensual para cada una de las estaciones en 2018.

radiación solar UV puede causar daños inmediatos en la piel, ojos y a largo plazo, está relacionada con problemas más graves como cáncer de piel y desarrollo de cataratas, entre otras enfermedades oculares.

La radiación ultravioleta (UV) tiene longitudes de onda entre 280 y 440 nm, la cual divide el espectro en dos tipos de UV, la radiación UV-B (Ultravioleta B) entre los 280 - 320 nm y la UV-A (Ultravioleta A) de 320 - 400 nm. La radiación correspondiente a UV-B (280 a 320 nm), provoca un mayor daño y se utiliza en el cálculo del índice UV (IUV), además es el tipo de radiación que influye directamente en la formación de ozono.

La Ciudad de México se encuentra en la latitud 19° N, por lo que recibe la radiación del sol durante todo el año, además por su altitud, 2240 msnm, está expuesta a un 20 % más de radiación ultravioleta con respecto al nivel del mar. La máxima intensidad de la radiación solar se recibe en verano durante el mes de julio, cuando los días son más largos y el sol se encuentra en su cenit (máximo 90° en el mediodía solar). Durante el invierno los días son más cortos, por lo tanto, la radiación es menor. Sin embargo, en la Ciudad de México la nubosidad generada por la temporada de lluvias reduce de manera considerable la intensidad de la radiación, por lo que en verano no reportan la máxima radiación solar, en comparación con los meses de la primavera.

En el año 2018, el promedio anual para el período diurno (8:00 a 20:00 h) de radiación UV-A fue de 2.0 W/m² y para la radiación UV-B de 0.09 W/m². En las series de tiempo anual de UV-A y UV-B (**Figura II.11 y II.12**) se observa que los máximos de radiación solar ultravioleta se reportaron en el periodo comprendido por los meses de mayo a agosto, con valores de 6.275 W/m² y 0.375 W/m² (UV-A y B respectivamente); mientras que los mínimos en los meses de invierno con 0.001 W/m² y 0.0001 W/m² (UV-A y B respectivamente).

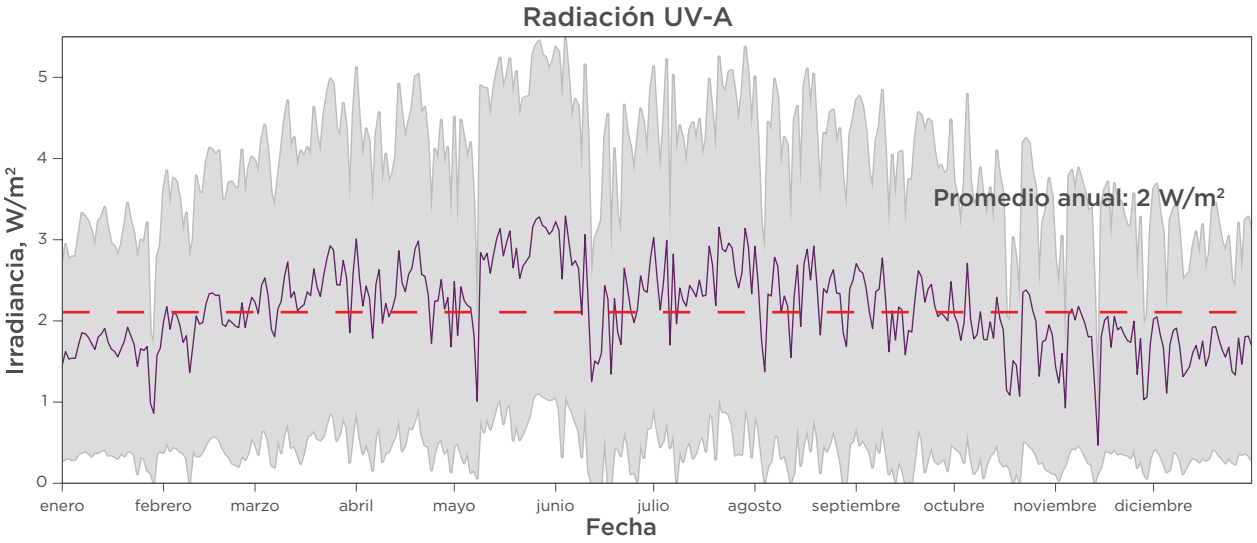


Figura II.11. Serie de tiempo para el promedio de los valores máximos diarios de radiación ultravioleta A. La línea continua indica el promedio de la intensidad de la radiación entre las 8:00 y 20:00 h; la región sombreada en gris se corresponde con la desviación estándar.

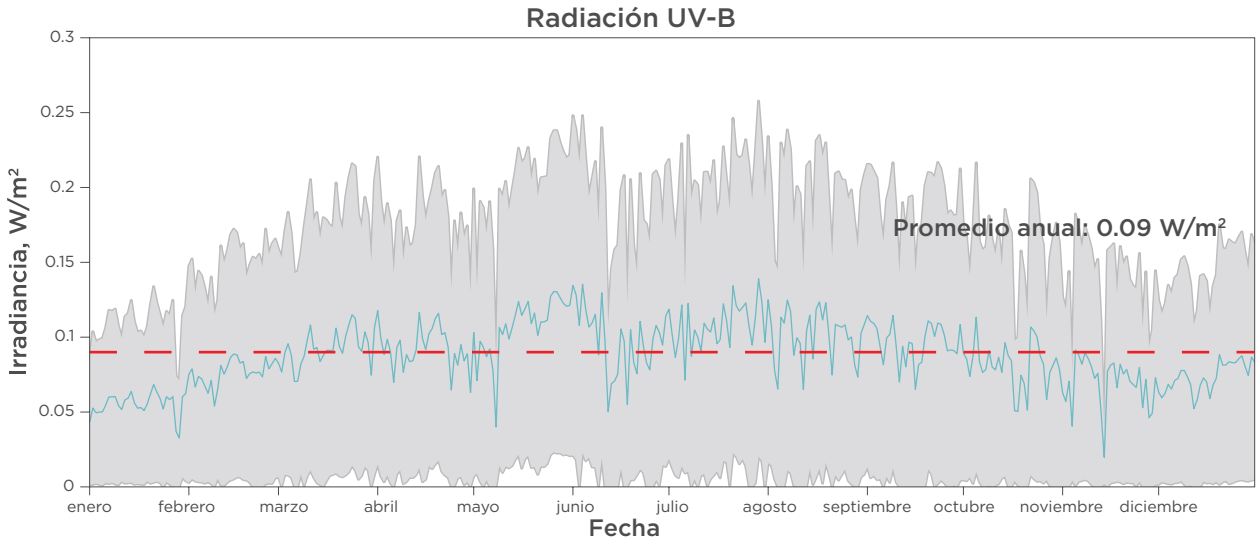


Figura II.12. Serie de tiempo para el promedio de los valores máximos diarios de radiación ultravioleta B. La línea continua indica el promedio de la intensidad de la radiación entre las 8:00 y 20:00 h; la región sombreada en gris se corresponde con la desviación estándar.

El Índice UV (IUV) es una medida de la intensidad de la radiación UV-B en la superficie terrestre y se utiliza para informar a la población sobre los niveles de radiación solar UV, este indicador expresa con una escala de 1 a 11+, la cantidad de radiación solar a la que se expone la población, cuanto más alto es el valor del IUV, mayor es la probabilidad de sufrir lesiones cutáneas u oculares. En la Ciudad de México, el IUV puede alcanzar un valor máximo equivalente a 15, sin embargo, se reporta como 11+ en apego a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003). El periodo del día en el que se presenta la mayor intensidad de la radiación solar y por lo tanto el IUV más alto, generalmente ocurre entre las 11:00 y las 15:00 h.

La escala del índice UV (IUV) se divide en cinco categorías: BAJA, MODERADA, ALTA, MUY ALTA y EXREMADAMENTE ALTA. Durante 2018, el IUV alcanzó valores de intensidad BAJA unicamente en un día (noviembre); MODERADA en solo dos días a inicios del año (enero y febrero); en 40 días del año se registró un IUV ALTO, cantidad similar a la reportada en 2017 y también se reportaron en los meses de época seca fría, de noviembre a febrero; la categoría correspondiente a MUY ALTA se presentó en 125 días; finalmente, se registró un incremento en el IUV EXTREMADAMENTE ALTO con 197 días, este número de días representó un aumento de 20% de días con esta categoría, comparado con 2017, y fueron los meses de junio a agosto los que registraron los valores más altos del IUV durante 2018 (**Figura II.13**).

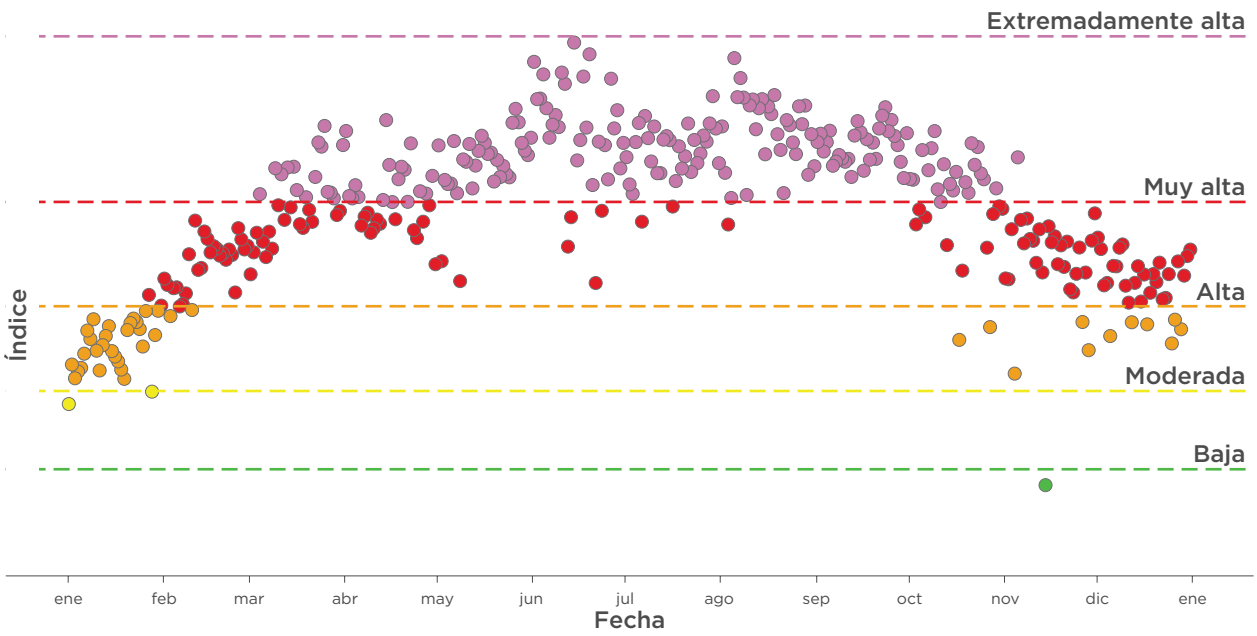


Figura II.13. Comportamiento de los máximos diarios del índice de radiación solar ultravioleta (IUV) durante 2018

3

CALIDAD DEL AIRE

Calidad del aire

La calidad del aire es la condición del aire que prevalece a nuestro alrededor. Una calidad del aire buena se refiere al estado del aire limpio (28% oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% trazas de otros compuestos) de apariencia transparente y libre de contaminantes como el humo, polvo y el smog, entre otras impurezas gaseosas. La calidad del aire se determina con la evaluación de una serie de indicadores estadísticos que permiten conocer las características del aire en un lugar y tiempo determinado.

El grado de deterioro de la calidad del aire se debe a la emisión de fuentes naturales como la erupción de los volcanes, producción de polvo ocasionada por los tornados o tormentas, incendios forestales, emisión natural de la vegetación, entre otras; y las emisiones antropogénicas como las generadas por los vehículos, los gases tóxicos de algunas industrias, la generación de basura y desechos; compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes del material que se utiliza en la impermeabilización, solventes, imprentas y artículos de limpieza de uso doméstico; así como las emisiones de gases y partículas por crematorios, fugas de gas de uso doméstico e industrial, etc. La degradación de la calidad del aire o contaminación atmosférica puede provocar efectos adversos en la salud de los humanos.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) cuenta con información de los contaminantes criterio y parámetros meteorológicos que permiten analizar y evaluar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) que tiene una cobertura que incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México y 29 municipios conurbados del Estado de México. Con esta información se puede caracterizar la calidad del aire y determinar qué contaminantes predominan, en qué zonas de la ciudad se presentan los máximos y en qué momento del día, de la semana o del año se registran estas concentraciones, así como identificar los patrones de comportamiento de los diferentes contaminantes y su relación con los parámetros meteorológicos, también es útil para evaluar la tendencia de los contaminantes a través de los años y analizar el impacto de los diferentes programas que se han implementado para el control de la contaminación.

En la ZMCM, el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes depende directamente de las emisiones y de los fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica registrados durante el año.

En este capítulo se analizó el comportamiento de los contaminantes (incluye Carbono Negro como un compuesto que afecta la visibilidad y puede ocasionar efectos en la salud) y del Índice de Calidad del Aire durante el 2018, así como sus tendencias a través del tiempo.

Dióxido de azufre

Contiene un átomo de azufre y dos de oxígeno (SO_2). Es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante que se comienza a percibir cuando supera los 300 ppb y un olor fuerte por encima de 500 ppb, no es inflamable, ni explosivo y es muy estable, además es soluble en agua. El dióxido de azufre es el precursor del ácido sulfúrico (H_2SO_4) el cual es un componente de los aerosoles que afecta la deposición ácida, el clima global y la capa de ozono. Durante su

proceso de oxidación en la atmósfera, este gas forma sulfatos. Estos sulfatos forman parte del material particulado PM_{10}. En presencia de humedad, el dióxido de azufre forma ácidos en forma de aerosoles y se produce una parte importante de material particulado secundario o fino ($PM_{2.5}$). Algunas de las fuentes principales que afectan la ZMCM por SO_2 es la refinería y termoeléctrica de Tula, el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, las emisiones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, la manufactura química, entre otros. Su remoción puede ser por la reacción química en la atmósfera para formar ácido sulfúrico, su disolución en agua a través de las nubes y el agua superficial (es relativamente soluble) así como su deposición en el hielo, nieve, suelo, vegetación y estructuras. La concentración de fondo que se encuentra en la tropósfera está en un rango de 10 ppt[2] a 1 ppb. En aire contaminado, el SO_2 de fondo está en el rango de 1 a 30 ppb (Jacobson, 2012).

Desde el año 2006, el SO_2 no ha alcanzado concentraciones que impliquen un problema para la salud debido al cambio de combustibles con bajo contenido de azufre. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), PEMEX suministra únicamente gasolina con bajo contenido de azufre (30 ppb). El diésel se denomina ultra bajo azufre y contiene como máximo 15 mg/kg (ppm) de azufre.

Durante 2018, la concentración promedio anual del contaminante fue de 4.3 ppb, y comparativamente, el año pasado fue de 4.7 ppb, lo que representa una disminución de cuatro décimas y para evitar el efecto de los valores extremos, se utiliza el valor de la mediana y se observa un cambio de 2 ppb desde 2013 a 2018, lo que significa que desde hace 5 años se han mantenido los niveles de concentración. Al comparar por entidad, el promedio anual de las estaciones que se ubican en la Ciudad de México es de 3.9 ppb y de 4.6 ppb el de los sitios que se localizan en los municipios conurbados del Estado de México.

Las estaciones que registran el mayor promedio son Tlalnepantla (TLA) y Tultitlán (TLI) con 8.1 ppb, el valor máximo horario registrado para 2018 fue de la estación Cuautitlán (CUT) con 354 ppb. Las estaciones ubicadas al noroeste de la zona metropolitana como Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), Atizapán (ATI), Cuautitlán (CUT) y Villa de las Flores (VIF), presentan los valores más altos de concentración promedio con un rango de 8.1 a 6.1 ppb, esto se debe a la influencia de fuentes regionales de SO_2 como es la zona de Tula (Hidalgo), donde se encuentra la refinería y la termoeléctrica, por lo que los eventos de alta concentración > 200 ppb (llamados “incrementos extraordinarios”) se registran normalmente en estas mismas estaciones, estos eventos se presentan cuando el viento dominante proviene de la dirección norte y que favorece el transporte del contaminante desde la región de Tula hacia la zona metropolitana de la Ciudad de México, aunado a esto, la época de frío con el incremento de inversiones térmicas y la permanencia hasta después del mediodía de la capa de mezcla baja. En la Ciudad de México, las estaciones que registran los valores más altos del promedio anual son las que se ubican en el centro como Merced (MER), Camarones (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Hospital General de México (HGM) y Benito Juárez (BJU) con un rango de 5.7 a 4.9 ppb. En contraste, los sitios de monitoreo que se ubican al sur de la zona metropolitana presentan las concentraciones más bajas, y están más relacionadas con las emisiones locales y no con las regionales (**Figura III.1**).

[2]ppt, partes por trillón 10^{-12}; ppb partes por billón 10^{-9}; ppm, partes por millón 10^{-6}.

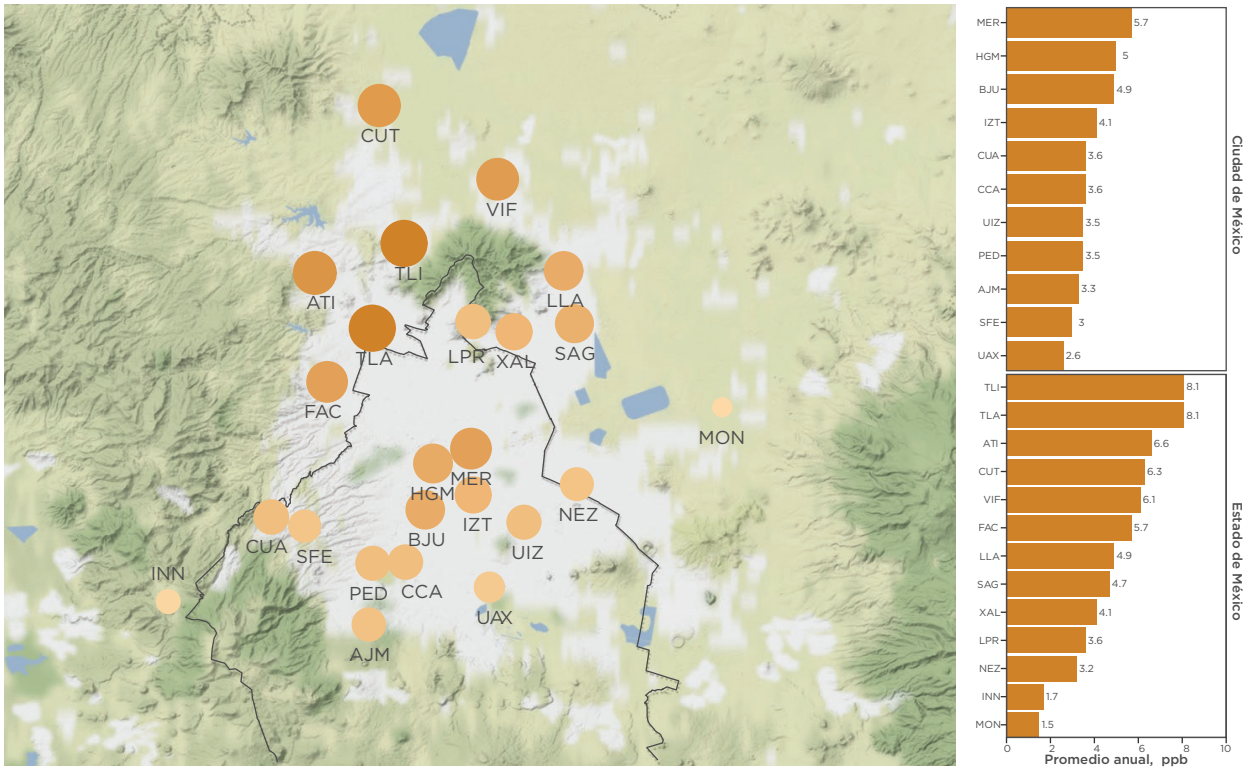


Figura III.1. Promedio anual por estación de monitoreo para dióxido de azufre. En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional a la magnitud del promedio anual y en las gráficas de barras se presenta el valor del promedio divido por entidad.

La serie de tiempo de los promedios diarios del contaminante para todas las estaciones de la RAMA (**Figura III.2**), muestra la variabilidad de los datos e indica que los meses de enero y diciembre registran los valores más altos de concentración de SO_2, lo cual coincide con la temporada seca fría, en la que existen factores meteorológicos que favorecen el estancamiento de los contaminantes cerca de la superficie. En general, en la temporada seca que abarca los meses de noviembre a mayo, los valores más altos de concentración se presentan con mayor frecuencia, como se ha mencionado anteriormente. Los valores mínimos se observan en la temporada de lluvia (junio a octubre), sin embargo, es importante recordar que el SO_2 es precursor de lluvia ácida al formar ácido sulfúrico cuando se disuelve en agua y su deposición produce efectos adversos en la vegetación, suelo y cuerpos de agua.

El perfil horario del SO_2, presenta un comportamiento unimodal (**Figura III.3a**), con un máximo alrededor de las 10:00 h, en la mayoría de las estaciones se observa un incremento entre las 8:00 y 12:00 h. Las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana presentan valores altos durante la madrugada que se asocian a los picos registrados cuando el viento dominante proviene del noroeste, aunado a la disminución de la capa de mezcla durante la noche y madrugada. En la estación Xalostoc (XAL), que se encuentra cerca de vialidades con alto flujo vehicular, comienza el incremento de

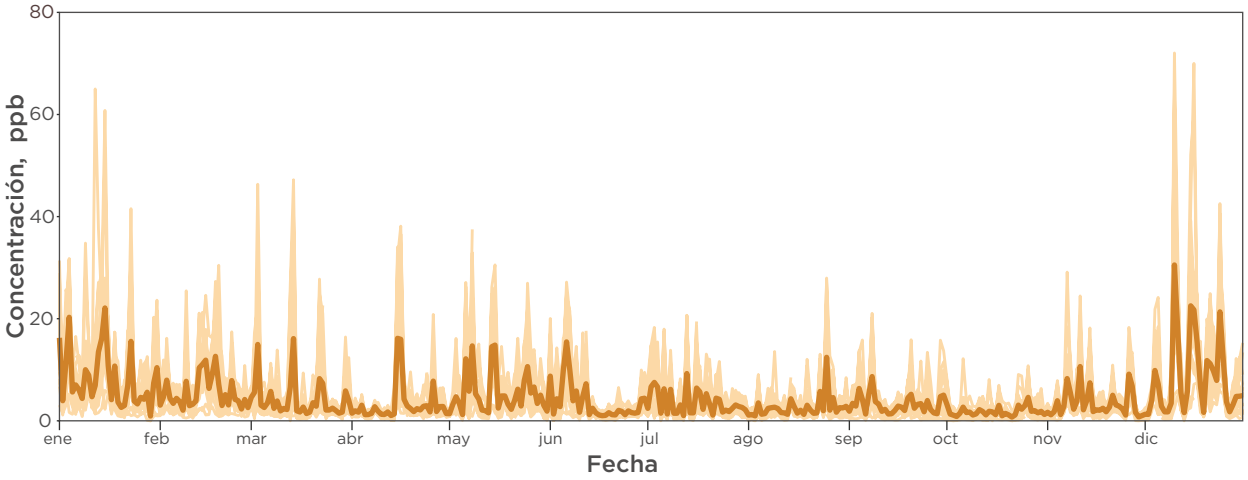


Figura III.2. Serie de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre. La línea gruesa indica el promedio aritmético de todas las estaciones mientras que las líneas delgadas corresponden al promedio diario de cada estación de monitoreo.

su concentración desde las 5:00 h y alcanza su máximo cuando hay mayor tránsito a las 8:00 h, estos niveles de SO_2 se relacionan con emisiones vehiculares. locales.

Al analizar el comportamiento por día de la semana (**Figura III.3b**), en este año el promedio máximo se registró el lunes y martes con 5.4 y 5.3 ppb respectivamente, mientras que, en 2017 fueron el sábado y domingo, los días que presentaron el promedio máximo con 5.2 y 5.4 ppb respectivamente. Esto se debe a que el contaminante no tiene un patrón definido en cuanto al comportamiento por día de la semana, esto se ha observado desde 2010 al 2018, ya que todos los años presenta diferentes patrones y

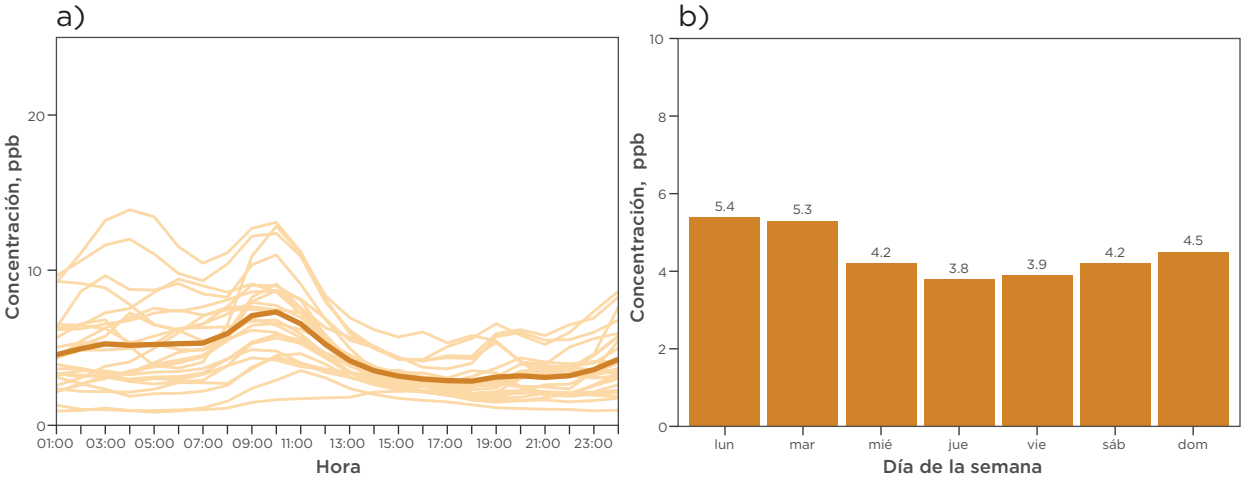


Figura III.3. a) Comportamiento horario de la concentración de SO_2, la línea gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas delgadas son el perfil horario de cada estación de monitoreo. **b)** Comportamiento semanal del SO_2, la barra representa el promedio de la concentración por cada día de la semana, con todas las estaciones de monitoreo.

tiene una ligera relación con los valores altos (> 200 ppb) registrados por día de la semana en ese año, lo que ocurrió en 2017 fue que el fin de semana registró los promedios más altos.

Es importante mencionar que la mayor contribución de este contaminante proviene de fuentes regionales y que aun cuando se presentan concentraciones horarias con valores > 200 ppb, ninguna estación de la ZMCM supera el valor límite de los tres indicadores que marca la norma NOM-022-SSA1-2010.

Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NOx) se le designa a un grupo de compuestos químicos gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno, los principales compuestos son óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2), y generalmente NOx hace referencia a la suma de NO + NO_2 = NOx.

El NO, también llamado monóxido de nitrógeno es un gas incoloro, poco soluble en agua y un radical libre, es precursor del ozono troposférico, del ácido nítrico (HNO_3) y del nitrato en partículas (NO_3), el HNO_3 tiene un impacto directo sobre la deposición ácida; sin embargo, el óxido nítrico no tiene regulación en ningún país, ni se considera contaminante criterio. La evidencia científica demuestra poco impacto sobre el clima, en su forma natural reduce el ozono en la estratósfera, así mismo, las emisiones de NO producidas por los aviones también tienen impacto en el ozono estratosférico. El óxido nítrico es el compuesto más abundante formado durante los procesos de combustión a alta temperatura, las fuentes incluyen al biocombustible y la quema de biomasa, así como la fotólisis y cinética de las reacciones químicas. De forma natural, el NO es emitido por los microorganismos del suelo y las plantas, actividad volcánica, incendios forestales, la descomposición del nitrito (NO_2^-) y descargas eléctricas atmosféricas, también se produce de la oxidación del amoniaco (NH_3) por procesos fotoquímicos en los océanos y algunas plantas. La fracción total del NO emitido depende de la cantidad de materia prima y las condiciones asociadas principalmente al proceso de combustión.

La mayor proporción del NOx emitido es de NO, se estima que es del 70 al 90%, mientras que la fracción del NO_2 es menor, del 10 hasta 30%. La concentración del NO de fondo es de 5 ppt, en las capas superiores de la atmósfera se estima que alcanza una concentración de 20 a 60 ppt. En regiones urbanas puede alcanzar 1000 ppb en las primeras horas de la mañana, y decrecer a cero por las reacciones con el ozono al mediodía (Jacobson, 2012).

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas tóxico e irritante de color marrón-amarillento, un potente agente oxidante formado por un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno, absorbe la onda corta de la radiación visible (azul y verde), esto es lo que le da su color café-rojizo, es un intermediario entre la emisión del NO y la formación del ozono, además es un precursor del ácido nítrico que es un componente de la deposición ácida. El NO_2 natural, al igual que NO, reduce el ozono en la estratósfera. El dióxido de nitrógeno es uno de los seis contaminantes criterio y cuenta con un valor límite de las NOM y regulación en muchos países del mundo, la exposición a niveles altos de concentración de NO_2 puede provocar daño en el pulmón y aumento de infecciones respiratorias. Los niños y asmáticos, son más susceptibles a enfermedades asociadas a niveles altos de NO_2. Se ha estimado que la exposición de 300 a 800 ppb de NO_2 en interiores, producido por las estufas, reduce la

capacidad pulmonar en aproximadamente 10% (Jacobson, 2012).

La mayor fuente de emisión de NO_2, es la oxidación del NO, otras fuentes son el combustible fósil así como la quema de biocombustible y biomasa. Las fuentes de emisión en interiores son los calentadores de queroseno, estufas que usan madera o gas LP, quema de biocombustibles para cocinar y el cigarro, entre otros. La concentración de fondo de este contaminante, tiene un rango de 10 a 50 ppt. En la capa superior de la atmósfera es de 30 a 70 ppt y en regiones urbanas de 50 a 250 ppb, en interiores como consecuencia de cocinar con gas o calentadores de gas y sin ventilación suficiente, puede alcanzar concentraciones de 20 a 50 ppb con picos de 400 a 1000 ppb. La reducción del NO y NO_2 se presenta a través de las reacciones químicas atmosféricas, disolución en el agua y deposición en el hielo, nieve, suelo, vegetación y estructuras (Jacobson, 2012).

Los promedios anuales de la concentracion de óxido nítrico, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno en 2018, para la zona metropolitana fueron: 16, 25 y 41 ppb, respectivamente. Los niveles de concentración de estos compuestos presentan una tendencia decreciente con una reducción del 3% comparada con 2017. La concentración máxima de NOx fue de 554 ppb en la estación Xalostoc (XAL) el 1° de febrero; NO_2 registró el valor máximo 141 ppb en la estación Tlalnepantla (TLA) el 17 de diciembre y por último el NO presentó el máximo en la estación XAL con 508 ppb el 1° de febrero, ambas estaciones se ubican en los municipios conurbados del Estado de México y la estación XAL está muy cerca de vías con alto tránsito vehicular.

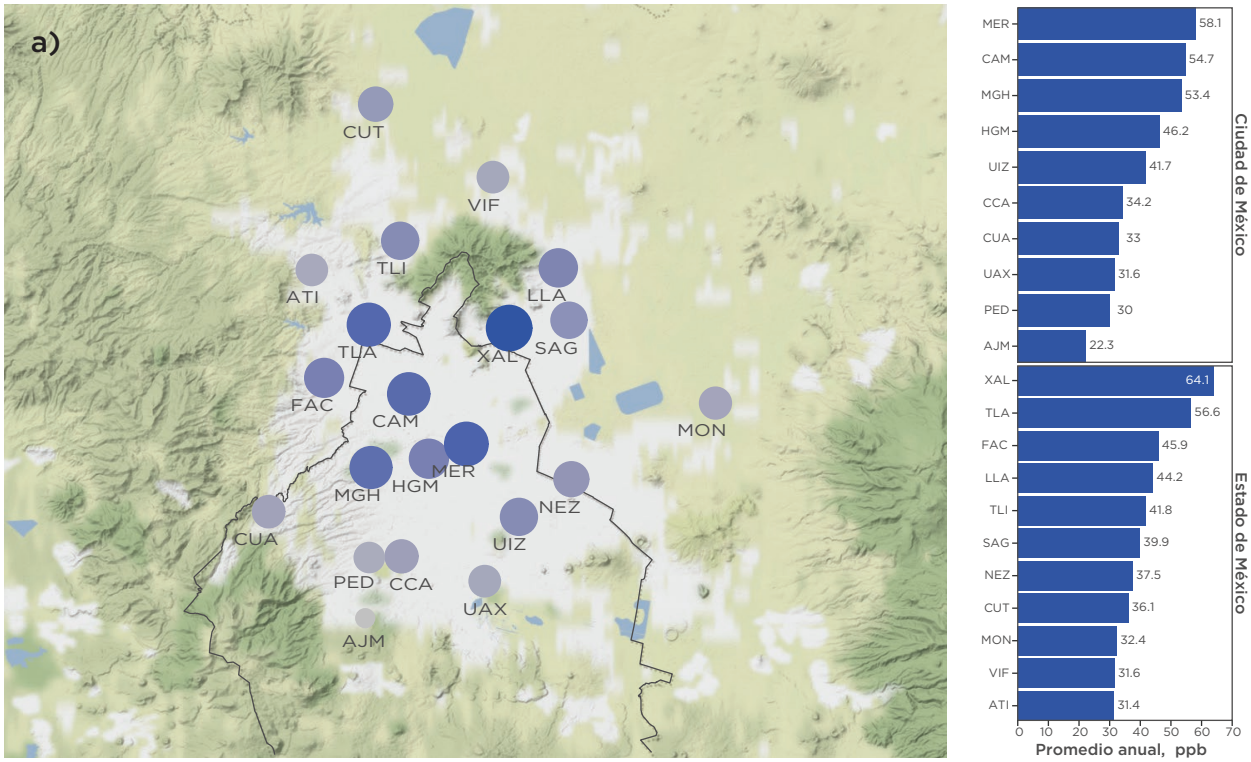
La distribución espacial de las especies nitrogenadas se puede observar en la **Figura III.4**, para el caso de NOx y NO las estaciones que presentan la mayor concentración son XAL, TLA, Merced (MER) y Camarones (CAM) que reciben el impacto de vías con alto tránsito vehicular porque se encuentran en el área de representatividad de la estación. El comportamiento bimodal refleja las horas pico del movimiento en el flujo vehicular y normalmente el máximo de la mañana es mayor al de la tarde-noche, el patrón del flujo vehicular es del norte hacia el centro de la zona metropolitana debido a que, en los municipios conurbados del Estado de México, es donde vive la mayoría de la población que trabaja en la Ciudad de México. En la distribución espacial de la concentración de NO_2, se observó que los valores más altos se encuentran en la región centro de la Ciudad, así como en las áreas industrializadas, debido a la gran cantidad de fuentes de emisión ubicadas en esas regiones. Las estaciones de monitoreo que registran los niveles de concentración elevados son: MER, CAM, Hospital General del México (HGM), Miguel Hidalgo (MGH), Iztacalco (IZT), XAL y TLA.

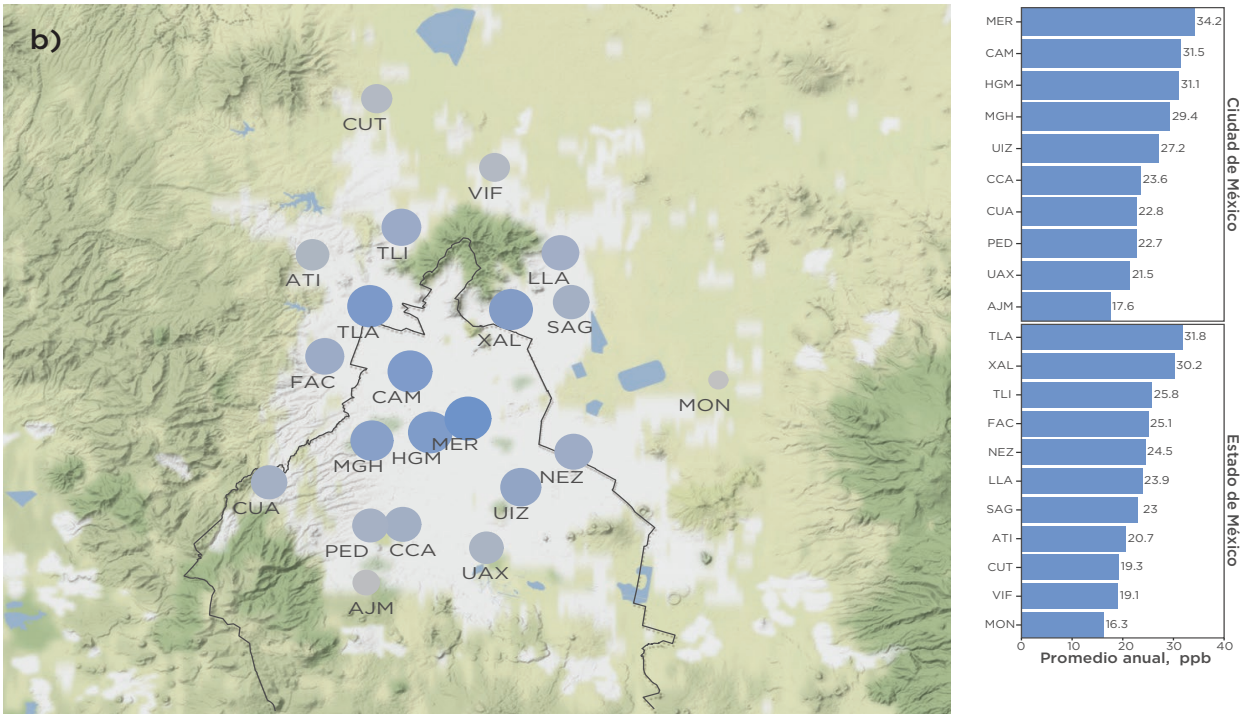
Las series de tiempo de los promedios diarios (**Figura III.5**), muestran el patrón estacional de los tres parámetros con los valores más altos en los meses fríos y con poca humedad (noviembre a febrero) mientras que los valores mínimos se presentan en la época de lluvia (junio a octubre), se observa cómo los tres parámetros tienen una relación con el tránsito vehicular, por ejemplo el 16 de marzo se presenta un incremento en todas las estaciones debido a que ese día fue viernes, de quincena y con puente por el día lunes 19, que fue de asueto oficial debido a la celebración del natalicio de Benito Juárez lo que conllevó a un aumento del tránsito vehicular.

El comportamiento del patrón horario de las especies que conforman los óxidos de nitrógeno (**Figura III.6**), presenta para el óxido nítrico, un pico muy pronunciado a las 8:00 h, similar al

que presenta el CO, entre las 7:00 y las 9:00 h; el cual está relacionado con el aumento del tránsito vehicular y la capa límite reconstruida, conforme la capa límite aumenta hacia el mediodía, la oxidación del NO produce el dióxido de nitrógeno (NO_2), es por ello que el incremento de este contaminante se presenta una hora después del máximo del NO a las 9:00 h. El NO_2 es removido lentamente por la reacción con el radical hidroxilo (OH) para dar origen al ácido nítrico (HNO_3), el cual es muy soluble en el agua y se forman aerosoles antes de regresar a NO_2 a través de la fotólisis, por la tarde-noche se observa un segundo incremento entre las 20:00 y 22:00 h debido a la fotoquímica y la reconstrucción de la capa límite, éste NO_2 nocturno produce especies reactivas como el radical nitrato (NO_3) que es el principal oxidante nocturno que reacciona rápidamente con hidrocarburos insaturados como alquenos lo que da origen a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (AOS o SOA por sus siglas en inglés), éste se reduce rápidamente por fotólisis (durante el día, su tiempo de vida es de 5 segundos), otra especie que se forma por el NO_2 nocturno es el pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5) que da origen al HNO_3 por hidrólisis (SEDEMA, 2017 y 2018a).

En 2018, para el caso de NO y NOx el viernes registra el promedio de concentración más alto y para el NO_2 el martes registra los niveles más altos, esta es una tendencia que se presenta desde 2015 con pocas variaciones en el valor promedio entre los días martes, miércoles y viernes, lo anterior debido al cambios de la movilidad en los últimos años. En general, los días laborables tienen pequeñas variaciones comparado con el sábado y domingo, que presenta una diferencia significativa (α=0.05, Kruskal-Wallis) debido a la reducción del tránsito vehicular durante el fin de semana y el domingo es el día que históricamente registra los valores más bajos (**Figura III.6**).





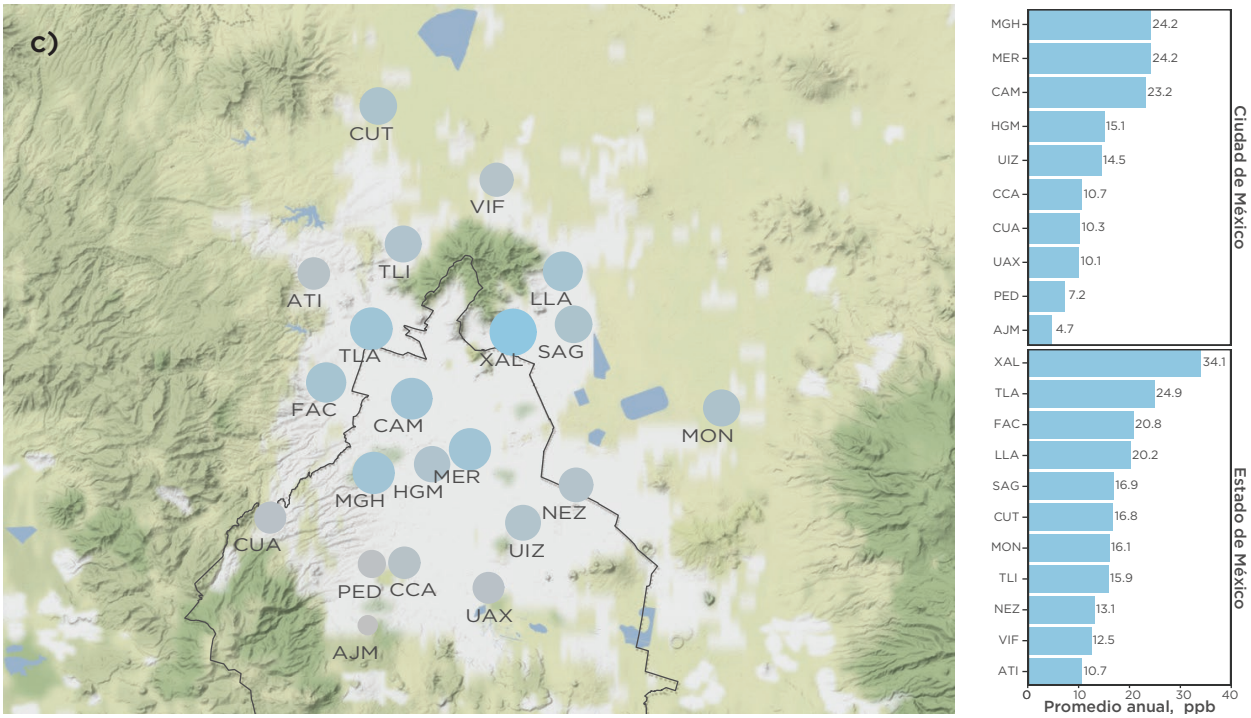


Figura III.4. Promedio anual por estación de monitoreo para: **a)** óxidos de nitrógeno (NOx), **b)** dióxido de nitrógeno (NO_2) y **c)** óxido nítrico (NO). En los mapas se presenta la ubicación de la estación y el tamaño del círculo es proporcional a la magnitud del promedio anual y en las gráficas de barras a la derecha se presenta el valor del promedio dividido por entidad.

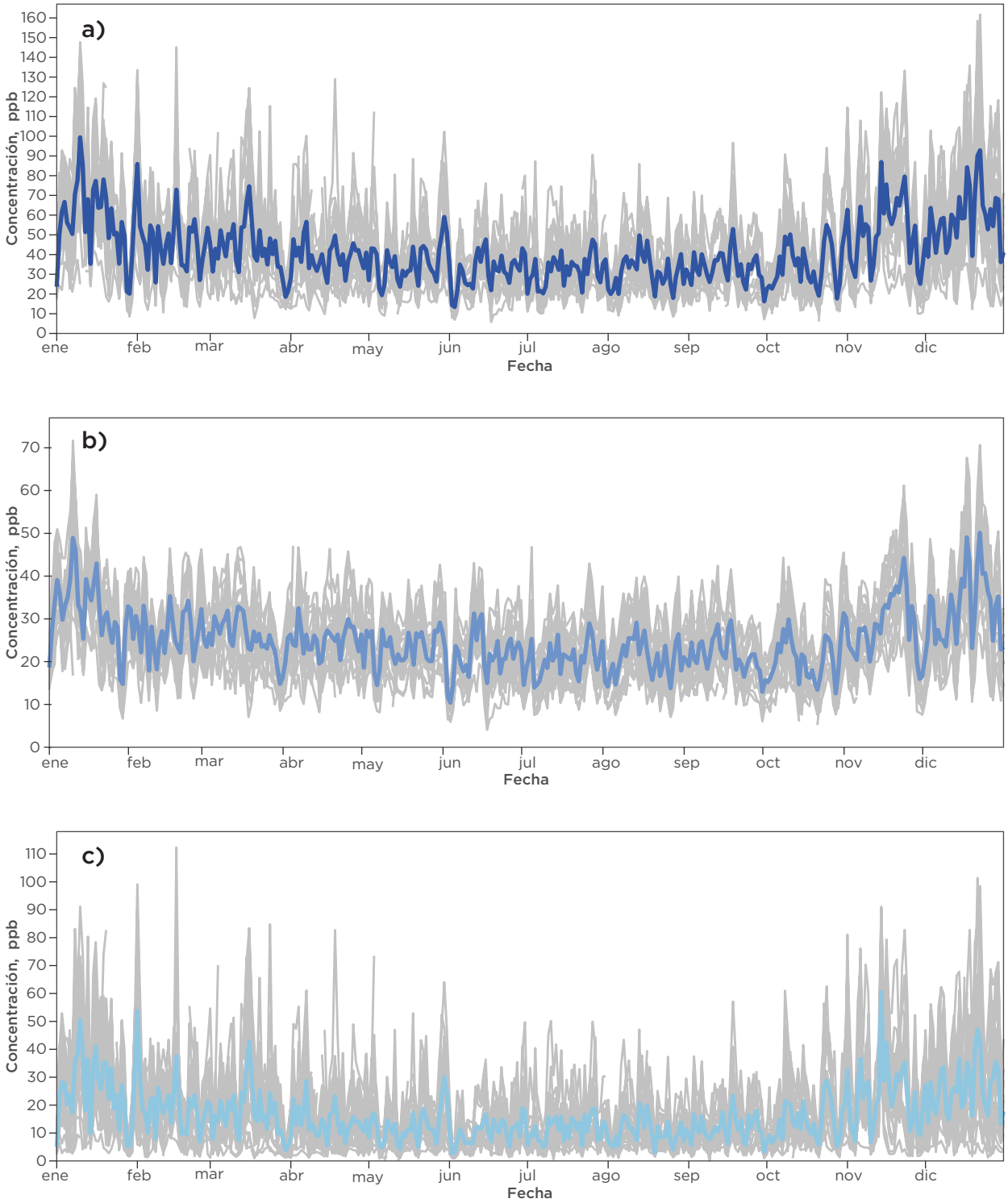


Figura III.5. Series de tiempo de los promedios diarios de: **a)** óxidos de nitrógeno (NOx); **b)** dióxido de nitrógeno (NO_2) y **c)** óxido nítrico (NO). La línea gruesa es el promedio diario de todas las estaciones mientras que las líneas grises corresponden al promedio diario de cada estación de monitoreo.

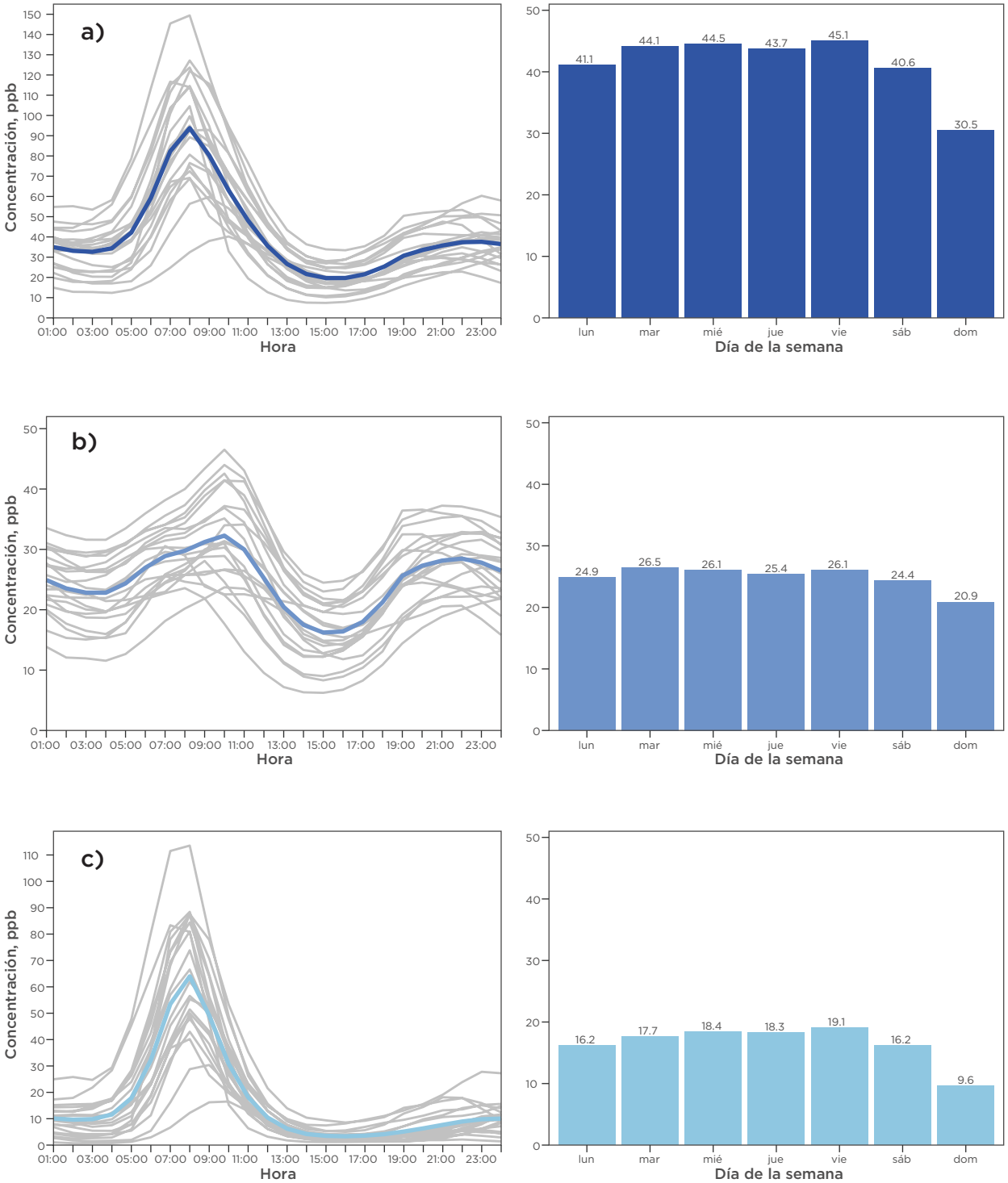


Figura III.6. Comportamiento horario de la concentración (izquierda), la línea gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada estación de monitoreo de: **a)** NOx, **b)** NO_2 y **c)** NO. A la derecha se presenta el comportamiento semanal, la barra corresponde al promedio de la concentración por cada día de la semana, con todas las estaciones de monitoreo de: **a)** NOx, **b)** NO_2 y **c)** NO.

Monóxido de carbono

Contiene un átomo de oxígeno y uno de carbono (CO). El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro e insípido, no es irritante y es altamente tóxico. Es el gas que más se emite junto con el vapor de agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2), pero tiene una mayor variabilidad en su distribución espacial y temporal. Su contribución en la formación de ozono es muy baja en comparación con los compuestos orgánicos volátiles; sin embargo, su emisión y oxidación en el ambiente, contribuye a la formación CO_2, lo cual tiene un impacto en el clima global.

El CO es un componente importante de la contaminación urbana y en interiores, por sus efectos nocivos para la salud a corto plazo es uno de los seis contaminantes del aire para los cuales las NOM tienen valores límite y en la mayoría de los países está regulado. Las principales fuentes que lo emiten es la combustión incompleta del gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, madera o carbón, así como otros procesos como la quema de biomasa y subproductos durante los procesos oxidativos para la obtención de sustancias químicas. En la ZMCM, las fuentes móviles aportan el 86% de las emisiones totales del CO, seguido de las fuentes de área con el 13%, las cuales están relacionadas con la combustión, de acuerdo con el inventario de la Ciudad de México de 2016 (SEDEMA, 2018b).

La remoción del CO puede ser por disolución en la superficie del agua y por deposición en el hielo, nieve, suelo, vegetación y estructuras. La concentración de fondo en la tropósfera se encuentra en un rango de 50 a 150 ppb, y su tiempo de vida en esta capa de la atmósfera es de 30 a 90 días. La concentración cerca de vialidades muy transitadas se puede encontrar entre 2 a 10 ppm. En una casa, puede encontrarse una concentración de 6 a 12 ppm cuando la estufa de gas se enciende (Jacobson, 2012).

Desde el año 2001, el CO no supera el valor límite normado de 11.0 ppm en el promedio de 8 horas esto debido a la efectividad de los programas que se han implementado en la Ciudad de México, así como la mejora tecnológica de los vehículos, lo que permitió la renovación de la flota vehicular con una edad promedio de 6.5 años, y es considerada la más nueva del país.

En 2018, el promedio anual del contaminante fue de 0.4 ppm con todas las estaciones y es el menor promedio registrado históricamente, con una diferencia de 0.2 ppm con respecto al promedio anual de 2017 (0.6 ppm). La concentración máxima horaria fue de 5.4 ppm en la estación Xalostoc (XAL), ubicada al noreste de la zona metropolitana, mientras que para el promedio móvil de 8 horas fue de 3.2 ppm en la estación Nezahualcóyotl (NEZ); en el caso de XAL, la estación se encuentra cerca de dos vialidades con alto flujo vehicular, la autopista México-Pachuca a 240 m de distancia y la vía Morelos a 160 m de distancia. Las estaciones La Presa (LPR) y XAL registraron el promedio anual más alto con 0.65 y 0.64 ppm, respectivamente (**Figura III.7**). Al comparar los promedios por estación con el año 2017, en todas las estaciones hay una reducción media de 24%.

La serie de tiempo presenta los promedios diarios del contaminante (**Figura III.8**), la emisión de este contaminante es prácticamente el mismo durante el año, con excepción de los días festivos, semana santa y vacaciones de verano, en los cuales disminuye el tránsito vehicular, al igual que los contaminantes primarios como SO_2 y óxidos de nitrógeno (NOx) que se emiten directamente hacia la atmósfera, el comportamiento de las concentraciones fueron mayores en los meses de la temporada fría, de noviembre a febrero, debido a las condiciones meteoroló-

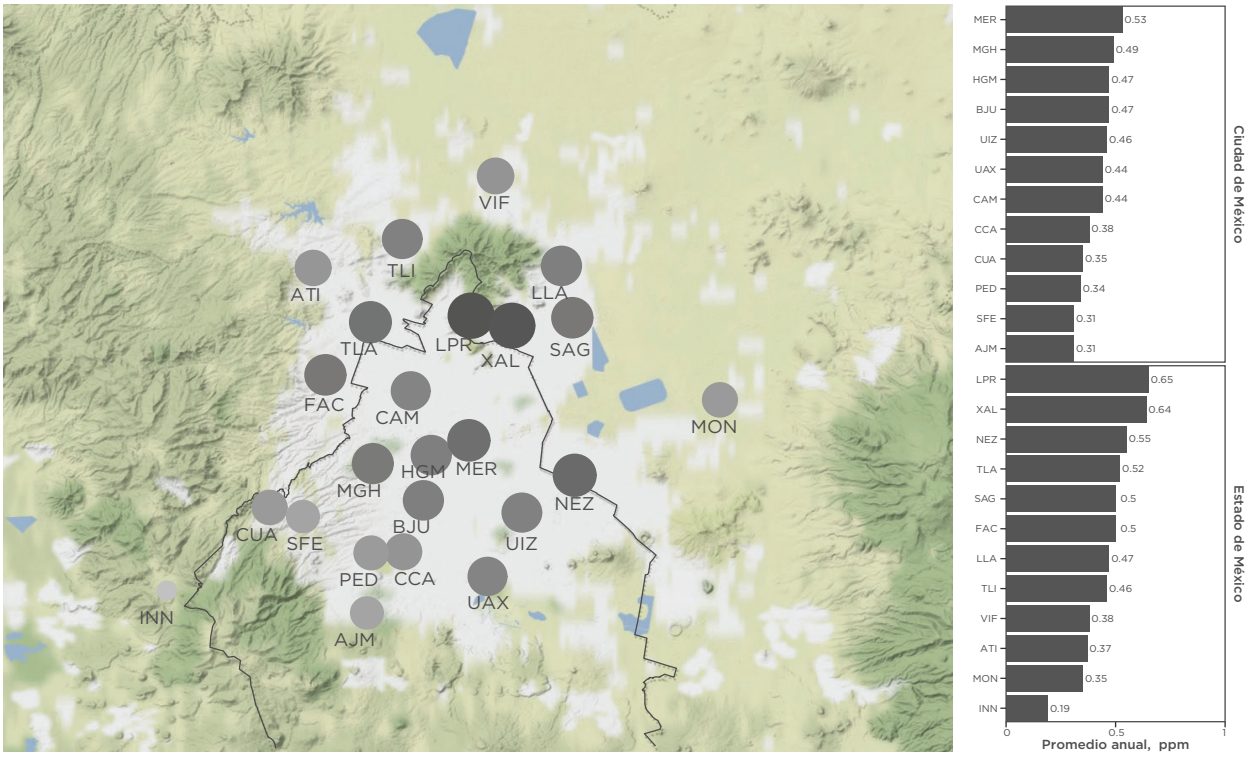


Figura III.7. Promedio anual por estación de monitoreo para monóxido de carbono. En los mapas se presenta la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional a la magnitud del promedio anual y en las gráficas de barras se presenta el valor del promedio divido por entidad.

gicas de estabilidad atmosférica asociadas a las inversiones térmicas, así como la disminución de la altura de la capa de mezcla y vientos débiles. El 16 de marzo de 2018 se observa un incremento en la concentración de CO al igual que el NOx, asociado al puente del tercer lunes de marzo y viernes de quincena, lo que confirma la relación directa del CO con la dinámica del tránsito vehicular.

En el perfil horario (**Figura III.9a**) se observa un pico muy pronunciado por la mañana y otro menor por la noche, el primero se da entre las 7:00 y 9:00 h, el segundo entre las 20:00 y 22:00 h. Este contaminante se distribuye al igual que el NOx, por la cantidad que se emite durante todo el día y su relación con la capa límite, ya que por la mañana la altura de la capa límite es baja y conforme la atmósfera se calienta, la altura de esta capa aumenta, por lo que hace que los contaminantes se dispersen y se observe la disminución de la concentración en el perfil horario; sin embargo, no es efecto de la reducción de la emisión sino que es debido al aumento de la capa límite y que permite una distribución del contaminante en toda la atmósfera. Las estaciones ubicadas en la zona urbana y relativamente cerca de vialidades con alto tránsito vehicular, presentan la mayor concentración, mientras que las estaciones al suroeste como Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Pedregal (PED) registran el valor máximo una hora después que las demás estaciones (9:00 h); en otras estaciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) o Milpa Alta (MPA) que se encuentran más alejadas del

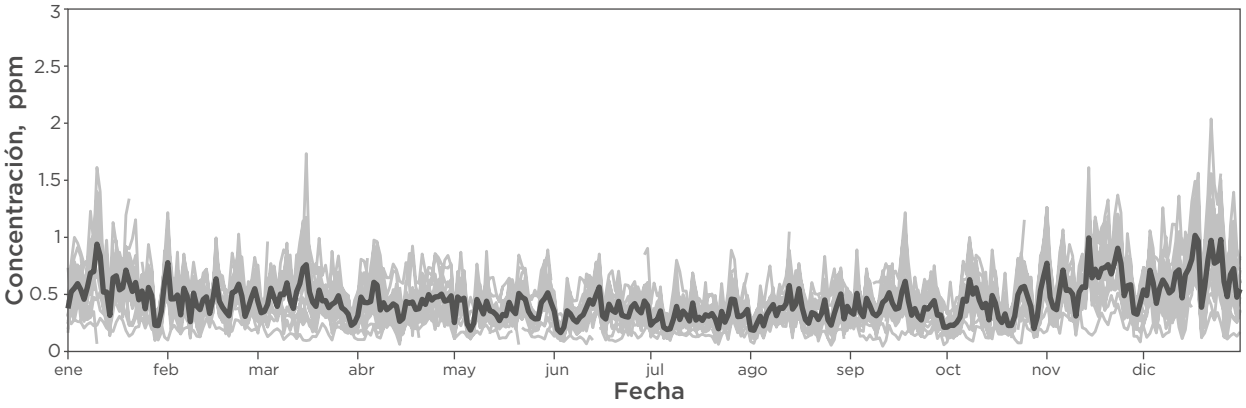


Figura III.8. Serie de tiempo con los promedios diarios de monóxido de carbono. La línea oscura indica el promedio aritmético de todas las estaciones mientras que, las líneas delgadas corresponden al promedio diario de cada estación de monitoreo.

tránsito vehicular y su objetivo de monitoreo es evaluar el transporte de la contaminación, presentan un perfil diferente, más alargado que el de otras estaciones y se puede observar el impacto del transporte del CO, dichas estaciones están representadas en las líneas delgadas hasta abajo del perfil general.

En cuanto al comportamiento por día de la semana (**Figura III.9b**), se observa cómo disminuye la concentración en fin de semana y el domingo es el día que, históricamente, registra el valor mínimo; mientras que el viernes presenta el máximo. Sin embargo, en 2018, el martes presentó los valores más altos de la semana.

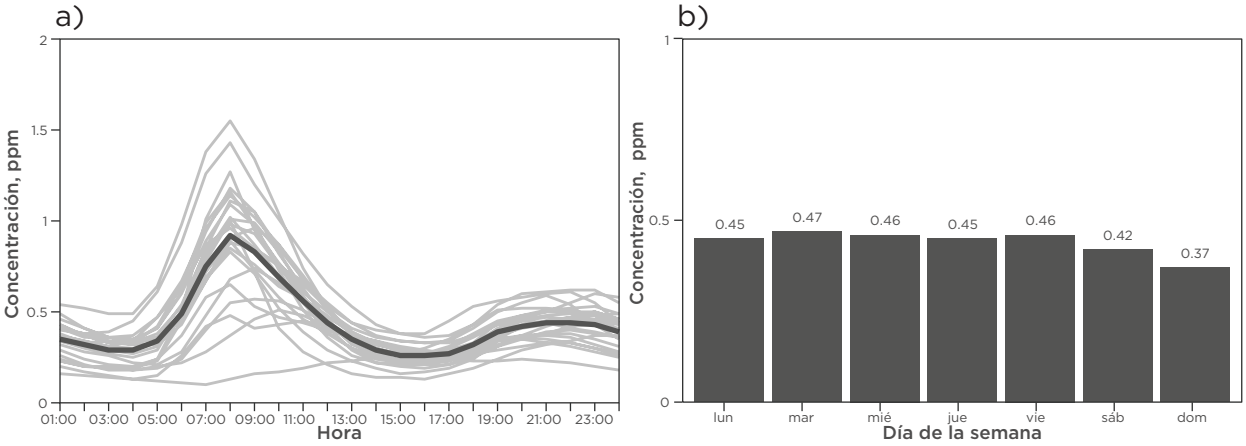


Figura III.9. a) Comportamiento horario de la concentración de CO, la línea gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas delgadas son el perfil horario de cada estación de monitoreo. **b)** Comportamiento semanal del CO, la barra representa el promedio de la concentración por cada día de la semana, con todas las estaciones de monitoreo.

Ozono

Contiene tres átomos de oxígeno (O_3), es un gas incoloro, pero en grandes concentraciones toma un color púrpura debido a que absorbe la longitud de onda verde de la luz visible por lo que refleja el rojo y azul, que se combinan para formar púrpura, es un gas que desprende fuerte olor (metálico y picante) cuando excede 20 ppb, de ahí su nombre de origen griego ozein (ὄζειν), que significa 'tener olor'. En la estratósfera absorbe la radiación UV y proporciona un escudo protector para la vida en la Tierra.

En la tropósfera, las emisiones antropogénicas de sus precursores (óxidos de nitrógeno - NOx y compuestos orgánicos volátiles - COV) incrementan su presencia, el O_3 es importante en la química de la tropósfera y de forma natural, la concentración de fondo se encuentra entre 20 y 40 ppb al nivel del mar, mientras que en altitudes mayores se encuentra en un rango entre 30 y 70 ppb (Jacobson, 2012). Para el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se puede consultar la descripción de la concentración de fondo estimada en el informe anual de 2016 (SEDEMA, 2017).

El O_3 es una especie reactiva y tóxica que contribuye al "efecto invernadero", por otro lado, en el proceso de absorción de la radiación UV genera átomos de oxígeno excitados electrónicamente que reaccionan para formar OH el cual es el principal oxidante atmosférico durante el día; si desapareciera el ozono troposférico, se observarían incrementos en el metano, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno debido a las reacciones que lleva a cabo con estas especies. Los niveles altos de ozono por su efecto oxidante, afectan el rendimiento de las cosechas, crecimiento de plantas y también producen afecciones respiratorias. Es paradójico el papel dual que tiene el ozono, debido a que en la estratósfera es "bueno" porque nos protege de la radiación UV, mientras que en la tropósfera es "malo" por los diversos impactos en salud y ambiente. La reducción del ozono ocurre por fotólisis, reacciones atmosféricas en fase gaseosa y sobre superficies, disolución en agua, así como por deposición en hielo, nieve, suelo, vegetación y estructuras (Jacobson, 2012).

Este año se caracterizó por presentar solo tres eventos con concentración igual o superior a 155 ppb, dos en la temporada de ozono (4 de mayo y 6 de junio) y la tercera el 23 de noviembre, de las cuales solo el 6 de junio se activó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA), debido a los criterios establecidos en este programa con respecto a la activación de las fases, que considera las condiciones meteorológicas del día siguiente, y si estas son favorables para la dispersión de la contaminación no se activa el PCAA. A pesar de ser un año con pocos eventos altos, la concentración promedio anual fue de 30 ppb, la cual no ha variado significativamente en los últimos 15 años; el promedio anual de los máximos diarios fue de 100 ppb. Al comparar con los valores de 2017, que se registró un promedio anual de 31 ppb y un promedio de los máximos de 103 ppb, en 2018 se observó ligero decremento en ambos indicadores.

La distribución espacial del número de horas con valores superiores a 95 ppb, que es el límite de la NOM en el indicador de una hora, se superó en 678 horas distribuidas en 210 días (sin considerar estaciones de transporte: ACO, INN, MPA, AJU y MON). Para el promedio móvil de 8 h (valor límite de la NOM: 70 ppb) se superó en 220 días con un registro máximo de 120 ppb el día 23 de noviembre en la estación Pedregal (PED). El número de horas por estación se presenta en la **Figura III.10** y se puede observar que las esta-

ciones del centro y suroeste de la zona metropolitana registraron el mayor número de horas, con las estaciones Pedregal (PED) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) las que presentaron más de 300 horas por arriba de 95 ppb en 2018, esto confirma lo que se ha mencionado en los informes anteriores sobre el flujo predominante del viento desde el norte de la ciudad, el cual es el responsable del arrastre de los precursores de ozono desde la zona de máxima generación de emisiones, del norte y centro, en dirección hacia el sur de la Ciudad de México, la acumulación en el suroeste provoca que sea la zona con mayores problemas por ozono y otros contaminantes secundarios, de hecho, de las 17 estaciones de la Ciudad de México que miden ozono, 13 (76% del total) registraron más de 100 horas con valores mayores a 95 ppb. Por el contrario, las estaciones que registran menos horas al año son Acolman (ACO) y Xalostoc (XAL) al norte, y Chalco (CHO) sureste.

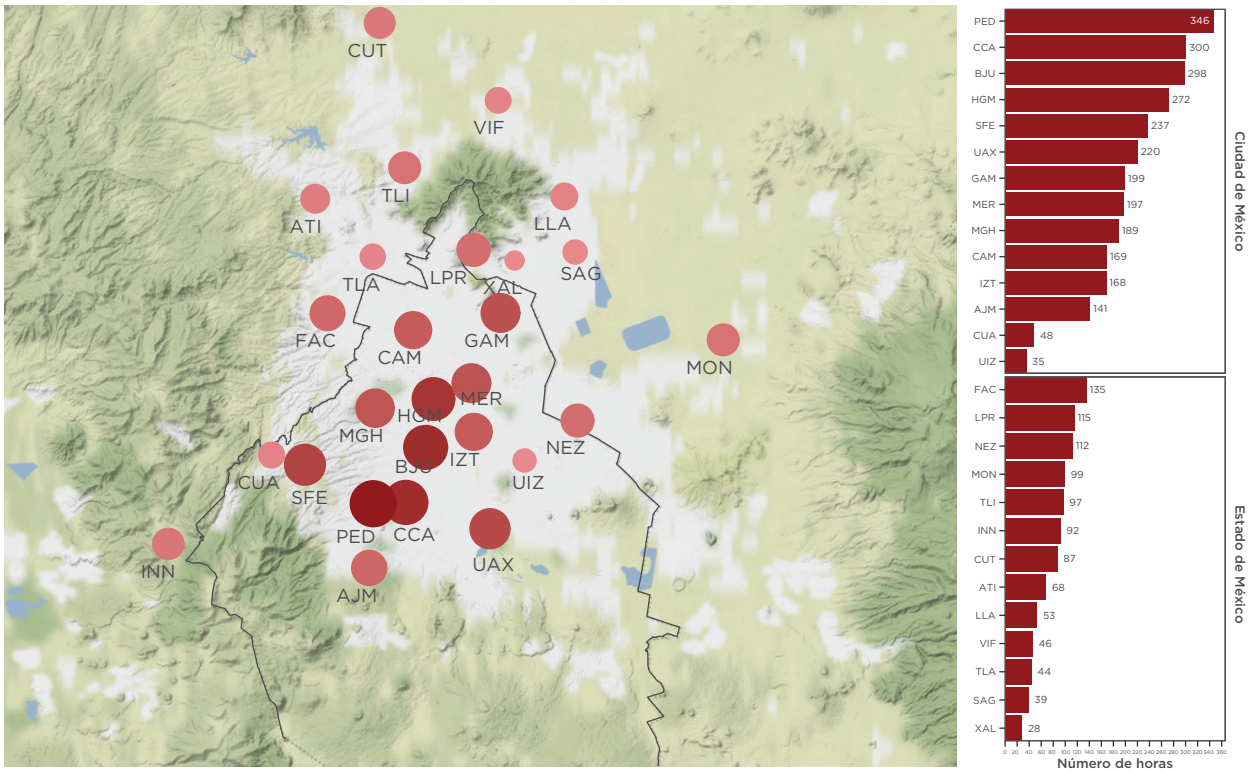


Figura III.10. Número de horas con concentración de ozono mayor a 95 ppb por estación de monitoreo. En el mapa de la izquierda, el tamaño del círculo y color es proporcional al valor del número de horas y en la gráfica de barras se presenta el conteo del número de horas divido por entidad.

La serie de tiempo del promedio diario por estación (**Figura III.11**), presenta el incremento de la concentración en la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio) con los valores máximos que oscilaron entre los 108 a 157 ppb, esta temporada se caracteriza por intensa radiación solar que favorece las reacciones de formación, temperaturas elevadas y sistemas

meteorológicos anticiclónicos que ocasionan estabilidad atmosférica que propicia vientos débiles y en consecuencia la acumulación de sus compuestos precursores (NOx y COV). En la temporada seca-fría (noviembre a febrero), el 23 de noviembre se alcanzó una concentración de 157 ppb, lo anterior se debió a un sistema anticiclónico que generó alta estabilidad que dificultó la dispersión del contaminante y provocó su acumulación por algunos días, esto ocurre ocasionalmente en esta temporada debido a etapas de transición con cambios de sistemas y de temporada meteorológica.

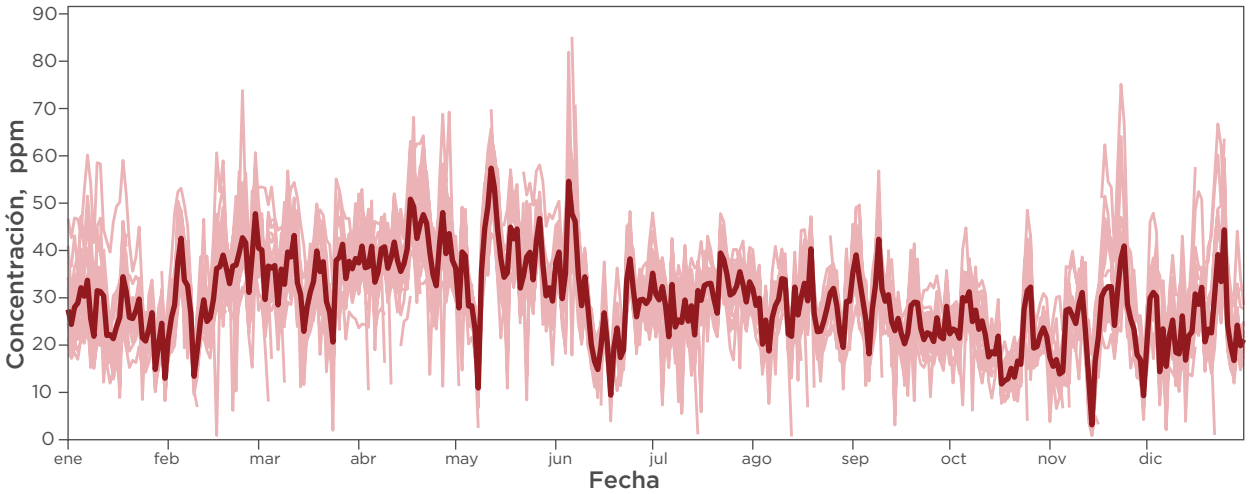


Figura III.11. Serie de tiempo de los promedios diarios de ozono. La línea gruesa indica el promedio aritmético de todas las estaciones, mientras que las líneas delgadas corresponden al promedio diario de cada estación de monitoreo.

El ozono como contaminante secundario, que depende de la abundancia de sus precursores (óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles) y la radiación solar, el aumento de su concentración inicia desde las 9:00 h cuando comienzan las reacciones fotoquímicas, el incremento continúa hasta alcanzar los máximos niveles entre las 14:00 y 16:00 h. Por la tarde, inicia el decremento de la concentración que se relaciona con el descenso del sol. Durante la noche y madrugada se han observado, principalmente en las estaciones ubicadas a mayor altitud de la ZMCM, concentraciones entre 20 y 35 ppb. En estas zonas, puede haber una mayor aportación de fuentes naturales y/o de ozono residual que permaneció estancado en las capas de la atmósfera. La concentración mínima se observa a las 7:00 h, esto como consecuencia de la titulación de ozono por las emisiones frescas de los óxidos de nitrógeno.

Los días de la semana (**Figura III.12b**) muestran poca variación de lunes a viernes con un promedio de 29 ppb, el sábado presenta una diferencia de 1 ppb de concentración (30 ppb) con respecto a los días de la semana y el domingo registra el valor máximo del promedio con 32 ppb, este comportamiento se presenta en años anteriores lo que confirma el efecto fin de semana y que la CDMX es sensible a los compuestos orgánicos volátiles (Stephen et al. 2013).

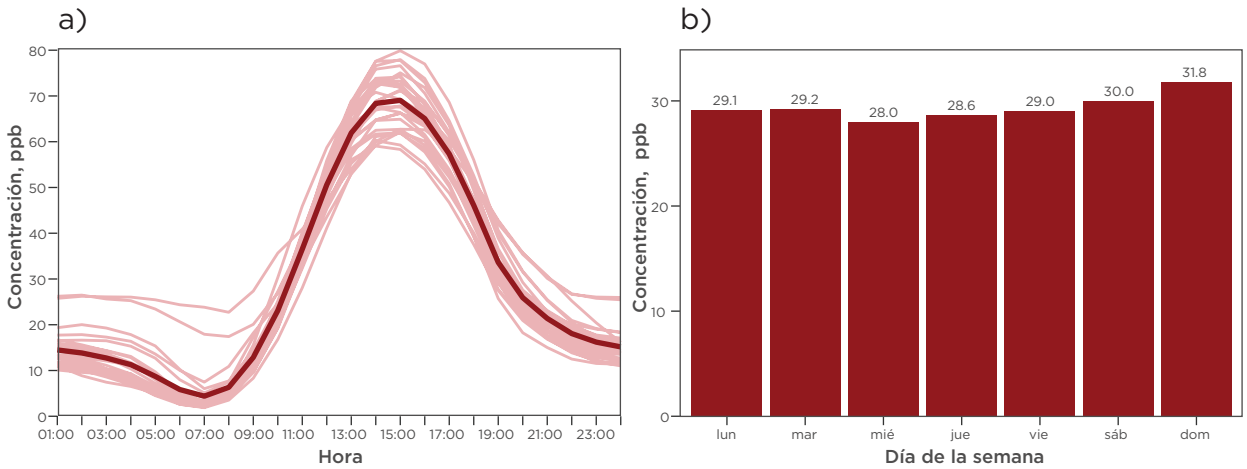


Figura III.12 a) Comportamiento horario de la concentración de O_3, la línea gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas delgadas corresponden al perfil horario de cada estación de monitoreo. **b)** Comportamiento semanal del O_3, la barra representa el promedio de la concentración por cada día de la semana, con todas las estaciones de monitoreo.

Partículas suspendidas

Las partículas en la atmósfera se emiten de fuentes naturales como el polvo, la brisa marina, incendios forestales y erupción de los volcanes, también se emiten de fuentes antropogénicas como la combustión, entre otras; un aerosol o material particulado se define técnicamente como una suspensión de partículas finas sólidas o líquidas en un gas. Cuando se emiten directamente a la atmósfera se denominan partículas primarias y si se forman por reacciones químicas, se clasifican como secundarias.

La importancia de las partículas depende de los fenómenos que las forman, la ubicación geográfica junto con la mezcla de emisiones que determinan su composición y la química atmosférica. Las partículas tienen una serie de propiedades que se consideran para su caracterización: la concentración numérica, su masa, tamaño, composición química, propiedades aerodinámicas y ópticas. El tamaño es de las características más importantes, ya que está relacionado con la fuente de emisión y con los efectos sobre la salud, la visibilidad y el clima. Las partículas, una vez que se encuentran en el aire, pueden variar de tamaño y composición debido a los procesos físicos o químicos que intervienen en su formación, como puede ser por condensación de especies evaporativas, por coagulación con otras partículas, debido a reacciones químicas o por activación en presencia de sobresaturación de agua para convertirse en niebla y gotas de agua en las nubes. De acuerdo a su tamaño, varían de 1 nm a 10 mm de diámetro, por lo que abarcan siete órdenes de magnitud y se clasifican como: **1)** partículas ultrafinas que son aerosoles de menos de 100 nm de diámetro (< 0.1 µm) y son nano partículas, **2)** partículas finas que van de 100 a 2,500 nm de diámetro (0.1 - 2.5 µm) y **3)** partículas gruesas mayores a 2,500 nm (>2.5 µm).

La suma de partículas ultrafinas y finas se le conoce como $PM_{2.5}$ mientras que la suma de todas las partículas menores a 10 µm de diámetro se denominan PM_{10}. Por lo tanto, las PM_{10} incluyen la contribución de $PM_{2.5}$ y $PM_{1.0}$ (suma de todas las partículas menores a 1 µm de diámetro, que se denominan submicrométricas). El principal proceso de remoción de las partículas gruesas en la atmósfera es por lluvia, sedimentación y deposición seca, las partículas más

pequeñas pueden permanecer suspendidas por largos periodos, mientras que las grandes suelen depositarse cerca del lugar donde son emitidas. En su composición se encuentra una variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas, que son tóxicas y peligrosas, por ejemplo, el benceno, bifenilos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, algunos metales y compuestos sulfurados. Las PM_{10} tienen un efecto directo con enfermedades pulmonares como el asma y el EPOC (MacNee y Donalson, 1999). Diversos estudios de salud concluyen que la concentración de las $PM_{2.5}$ ambiental puede incrementar la mortalidad prematura, la admisión hospitalaria, visitas de emergencia por complicaciones de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como el desarrollo de enfermedades respiratorias crónicas (US EPA, 2009).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), mide las partículas con equipos automáticos en la Red Automática (RAMA) en tres fracciones: PM_{10}, $PM_{2.5}$ conocidas como partículas finas y la fracción gruesa; esta última es la diferencia de concentración entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ ($PM_{10-2.5}$). También, a través de equipo de operación manual o semiautomático denominado "método de referencia", se toman muestras cada seis días, a través de la Red Manual (REDMA) de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM_{10} y $PM_{2.5}$. La información obtenida con esta red se utiliza para comparar con los equipos continuos, evaluar la Norma Oficial Mexicana de salud (NOM) y determinar su composición.

Las PM_{10} representan la suma de las fracciones fina y gruesa, de la masa total de éstas, el 52% corresponde a $PM_{2.5}$ y el 48% a $PM_{10-2.5}$ (**Figura III.13a**). La proporción entre la fracción gruesa y fina de las partículas tiene un comportamiento variable durante el día, debido a que las emisiones primarias tienen un mayor impacto en la fracción gruesa y aumenta su proporción en dos momentos del día, uno que se relaciona con las horas de mayor tránsito vehicular por la mañana (de 7:00 a 9:00 h) y el segundo en la tarde-noche (de 17:00 a 22:00 h), por otro lado la fracción fina tiene relación con la formación de compuestos de origen secundario, los cuales se presentan entre las 11:00 y las 15:00 h por lo que esta fracción representa más del 55% durante estas horas. En las horas restantes del día, la proporción entre ambas fracciones es prácticamente igual (**Figura III.13b**).

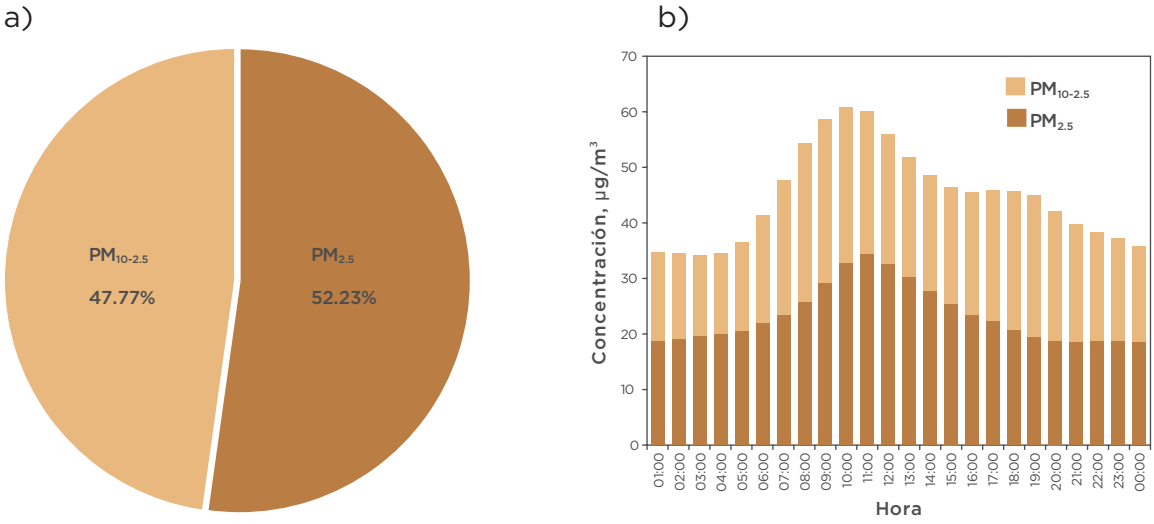


Figura III.13 a) Contribución de las partículas $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$ a la masa total de las PM_{10}. **b)** Proporción horaria del promedio de $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$.

La distribución espacial de la proporción de las fracciones varía de acuerdo con la ubicación de la estación; si hay vialidades importantes en el área de representatividad de la estación, la fracción gruesa será mayor y si el sitio de monitoreo se encuentra viento abajo, donde la formación de compuestos secundarios es mayor, entonces la contribución de la fracción fina aumenta, (**Figura III.14**). Al noreste de la ciudad, la estación XAL se ubica cerca de vialidades importantes como la carretera México-Pachuca y la Vía Morelos, las cuales tienen flujo vehicular alto durante todo el día, además se encuentra cerca de la zona industrial de Ecatepec, dicha estación tiene la mayor proporción, en promedio anual, de la fracción gruesa con un 60%. Las estaciones Tlalnepantla (TLA) y Merced (MER) presentan una proporción similar en ambas fracciones que puede relacionarse a la contribución de fuentes primarias, así como a la formación de los compuestos secundarios por su ubicación en la trayectoria del viento. La estación Ajusco Medio (AJM) ubicada al sur de la ciudad, tiene una proporción de partículas finas del 58%, sin embargo, en las estaciones que se ubican al suroeste y poniente de la ciudad presentan una mayor proporción de esta fracción con más del 60% durante casi todo el día y a partir de las primeras horas de la tarde comienza a decrecer dicha proporción y llega a ~50%.

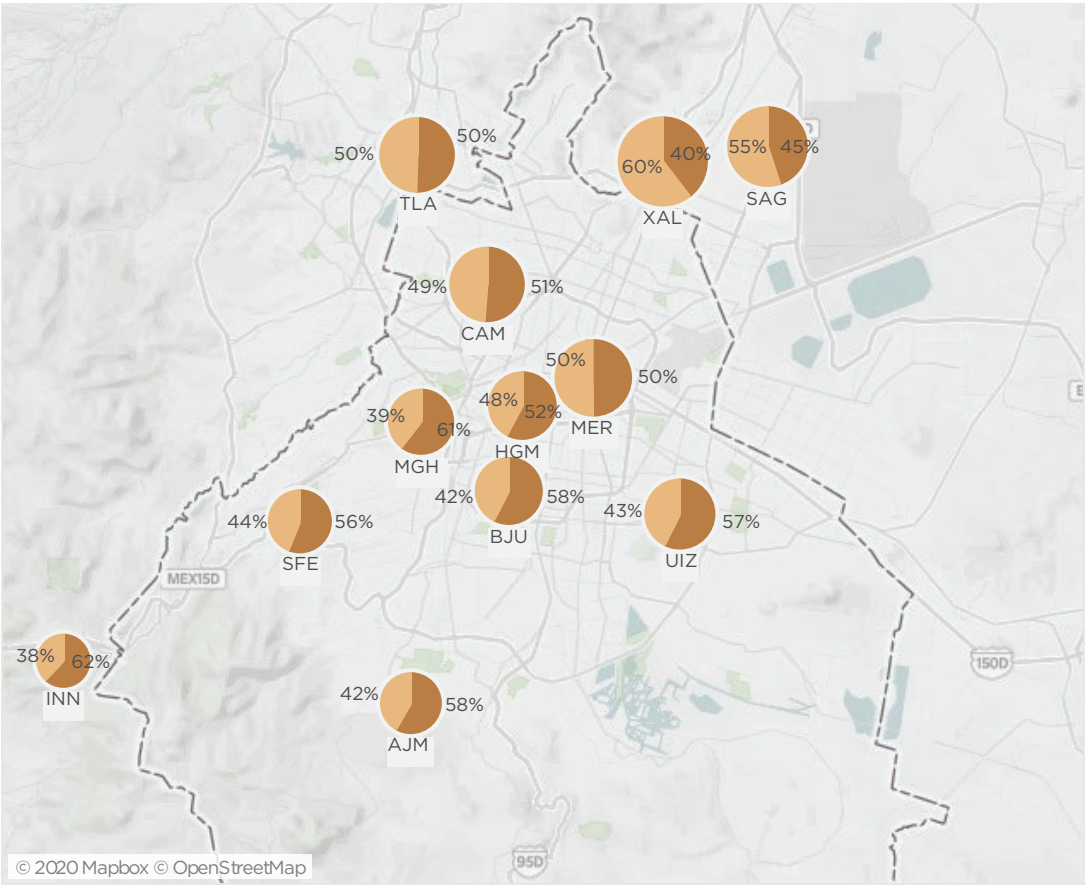


Figura III.14 Distribución espacial de la contribución promedio anual de las fracciones fina ($PM_{2.5}$) y gruesa ($PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$) a la concentración total de $PM_{10-2.5}$, por estación de monitoreo que cumplió con más del 75% de datos válidos durante el año.

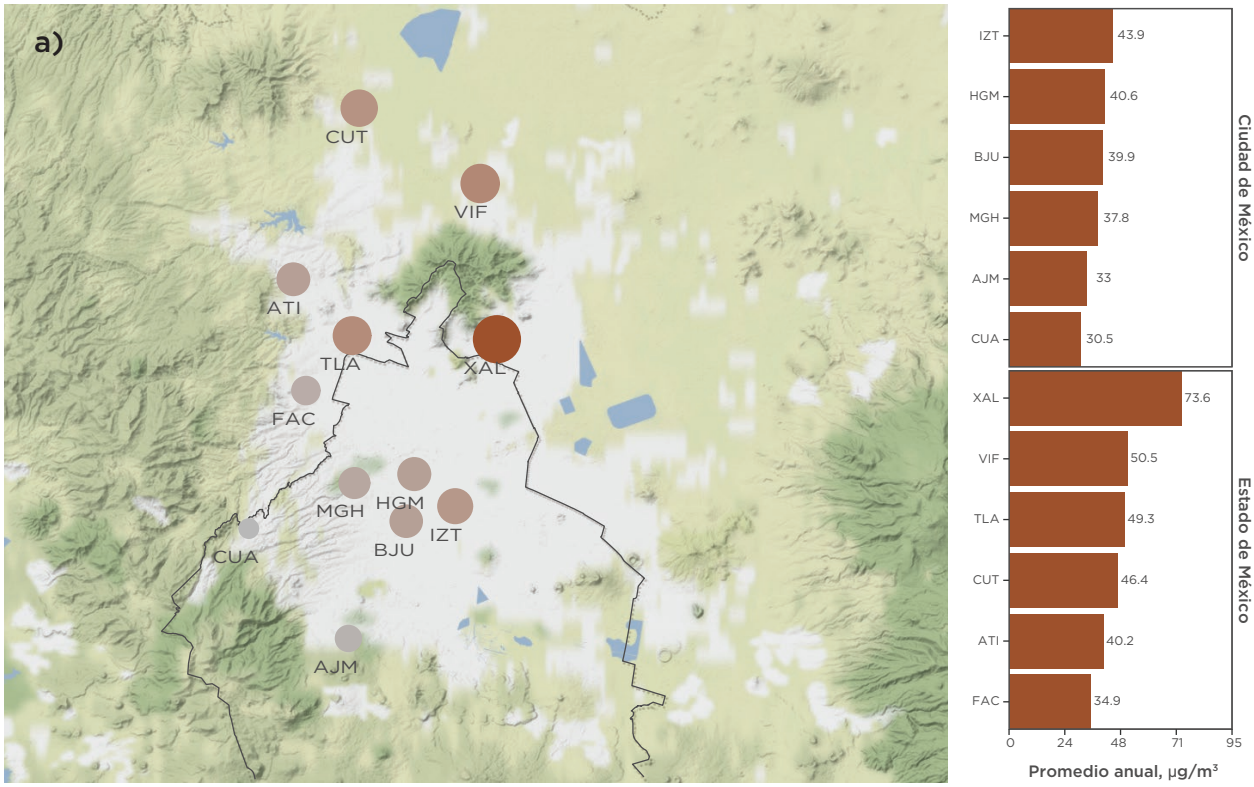
En 2018, los promedios anuales del monitoreo continuo en la zona metropolitana fueron de 74 µg/m^3 para PM_{10}; 29 µg/m^3 para en $PM_{2.5}$; y de 45 µg/m^3 para $PM_{10-2.5}$. En la Ciudad de México, el promedio anual se registró un valor de 44 µg/m^3 para PM_{10} y; 25 y 17 µg/m^3 en las fracciones $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$, estos valores se registraron en las estaciones IZT, GAM y HGM, respectivamente. Por otro lado, la concentración máxima del promedio de 24 horas se registró en las estaciones del norte de la zona metropolitana con 199 µg/m^3 para PM_{10} (el 25 de diciembre en la estación Villa de las Flores, VIF); 118 µg/m^3 para $PM_{2.5}$ (25 de diciembre en NEZ y seis estaciones rebasaron el valor de 90 µg/m^3 ese mismo día) y de 117 µg/m^3 para $PM_{10-2.5}$ (el 10 de enero en la estación XAL). Es importante mencionar el impacto de la pirotecnia en las celebraciones de fin de año, debido a que ocasionan altos niveles de concentración de partículas en el ambiente, e históricamente, la mayoría de los eventos de alta concentración por partículas se registran tanto el 25 de diciembre como el 1 de enero. Las plumas de contaminación producidas por pirotecnia contienen una gran cantidad de partículas con iones solubles en agua y metales traza. El 50% de las emisiones por pirotecnia contienen iones como el sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+), potasio (K^+) y cloruro (Cl^-). En 2019 se publicó un estudio sobre el impacto de los juegos pirotécnicos durante las celebraciones de fin de año, y se encontró que durante el periodo de mayor intensidad de la actividad pirotécnica, se presentan los tres iones inorgánicos amonio, nitrato y sulfato en cantidades que alcanzaron el 26% del total de la masa de las $PM_{2.5}$, así como los aerosoles orgánicos que contribuyen con el 25% de esta masa (Retama et al., 2019). Adicionalmente, se sabe que las partículas que se forman debido a las emisiones de la pirotecnia tienen un alto potencial oxidativo que está asociado al estrés oxidativo con efectos adversos a la salud de la población, así como un impacto negativo sobre enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Yang et al. 2014; Fang et al. 2017).

En la **Figura III.15** se presenta la distribución espacial de las diferentes fracciones y, como se mencionó anteriormente, en el caso de las partículas gruesas, hay una influencia importante de las emisiones locales para las partículas gruesas como es el caso de la estación Xalostoc (XAL). En las $PM_{2.5}$ se observa una gran homogeneidad entre todas las estaciones, solo las que se encuentran en el límite de la zona metropolitana, al sur y poniente, presentan una concentración menor a 20 µg/m^3 como Ajusco Medio (AJM), Instituto de Investigaciones Nucleares (INN) y Santa Fe (SFE).

Las series de tiempo (**Figura III.16**) muestran que, para los meses invernales (enero y diciembre), se registran los valores más altos, debido al incremento de inversiones térmicas, condiciones de estabilidad atmosférica y disminución de la capa de mezcla en esta temporada, y las concentraciones menores se registran en la temporada de lluvia que se presenta el efecto de lavado atmosférico. En 2018, el mes de agosto registró la concentración promedio mínima en $PM_{10-2.5}$, mientras que en octubre, $PM_{2.5}$ y PM_{10} presentaron su menor concentración. El 16 de julio se observa un ligero incremento de partículas, esto se debió a que se registró un sistema de alta presión que provocó estabilidad atmosférica desde el sábado 14, posteriormente, el día 16 se presentó una mayor temperatura y menor humedad, así como velocidad del viento baja, con un promedio de 1.9 m/s; las estaciones que se ubican en el norte y centro registraron los valores más altos de las tres fracciones de partículas.

El comportamiento horario de las tres fracciones PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ (**Figura III.17**), presenta el mismo patrón que se ha descrito en los informes anteriores, para las dos primeras fracciones se presentan dos picos (8:00 a 9:00 h y 19:00 h) que concuerdan con los picos de CO y NO_2, en las estaciones al centro y norte de la ZMCM, el pico de la mañana es mayor que en la tarde. Para el caso de las $PM_{2.5}$, las estaciones ubicadas en el norte y centro de la ZMCM presentan el pico muy definido a las 11:00 h, con la formación de las partículas secundarias, mientras que en las estaciones al sur o poniente de la zona metropolitana, la duración del pico es más prolongado y en algunas estaciones decrece por la tarde a partir de las 17:00 h, por ejemplo en SFE, INN, AJM y AJU, que como se mencionó anteriormente, se ubican en los límites de la zona metropolitana y por donde salen los vientos, lo que ocasiona arrastre de los contaminantes así como la formación de los aerosoles secundarios.

En los días de la semana para 2018, las tres fracciones presentan la concentración promedio más alta en martes y el valor mínimo en el domingo. Las PM_{10} y $PM_{10-2.5}$, presentan un comportamiento semejante al monóxido de carbono y a los óxidos de nitrógeno como emisiones primarias, con una reducción notoria los fines de semana y un ligero incremento los viernes. Las $PM_{2.5}$, el valor más alto se registró en martes y el menor en domingo, semejante al patrón que se presentó en 2017 (SEDEMA, 2018a).



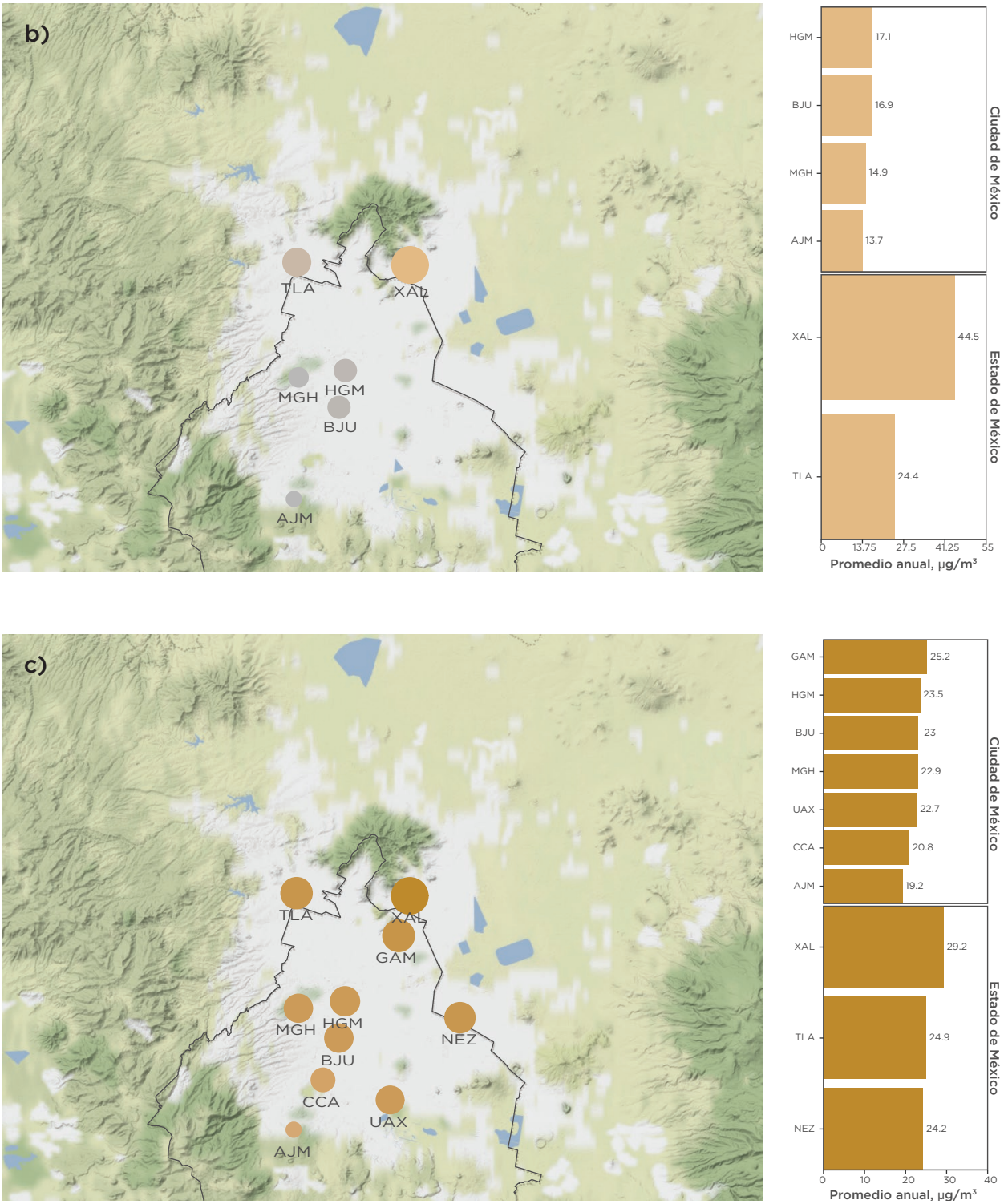


Figura III.15. Promedio anual por estación de monitoreo para: **a)** PM_{10}, **b)** $PM_{10-2.5}$ y **c)** $PM_{2.5}$. En los mapas se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo es proporcional a la magnitud del promedio anual y en las gráficas de barras se presenta el valor del promedio divido por entidad.

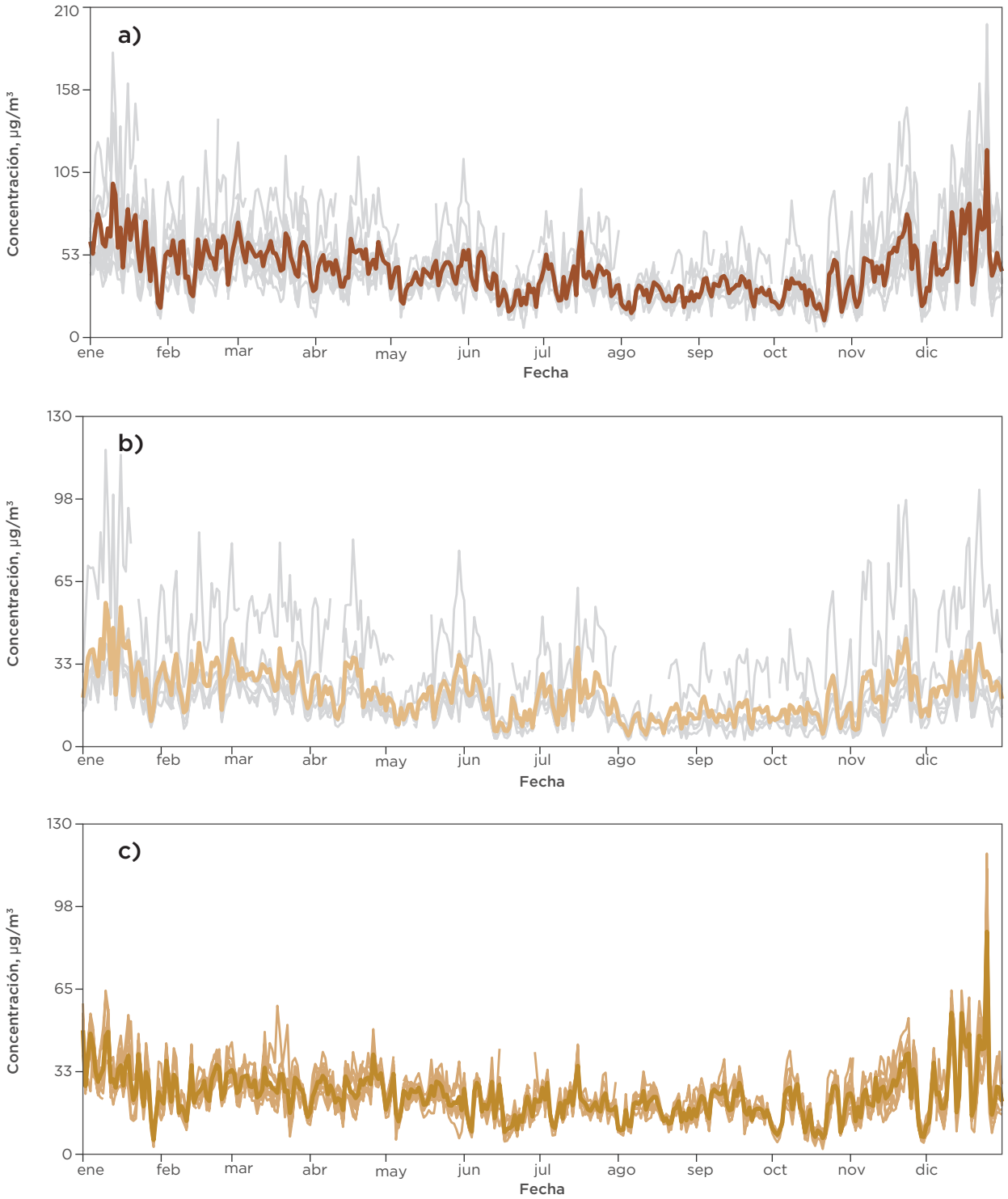


Figura III.16. Series de tiempo de los promedios diarios de **a)** PM_{10}; **b)** $PM_{10-2.5}$ y **c)** $PM_{2.5}$. La línea gruesa indica el promedio diario de todas las estaciones mientras que las líneas delgadas corresponden al promedio de cada estación de monitoreo.

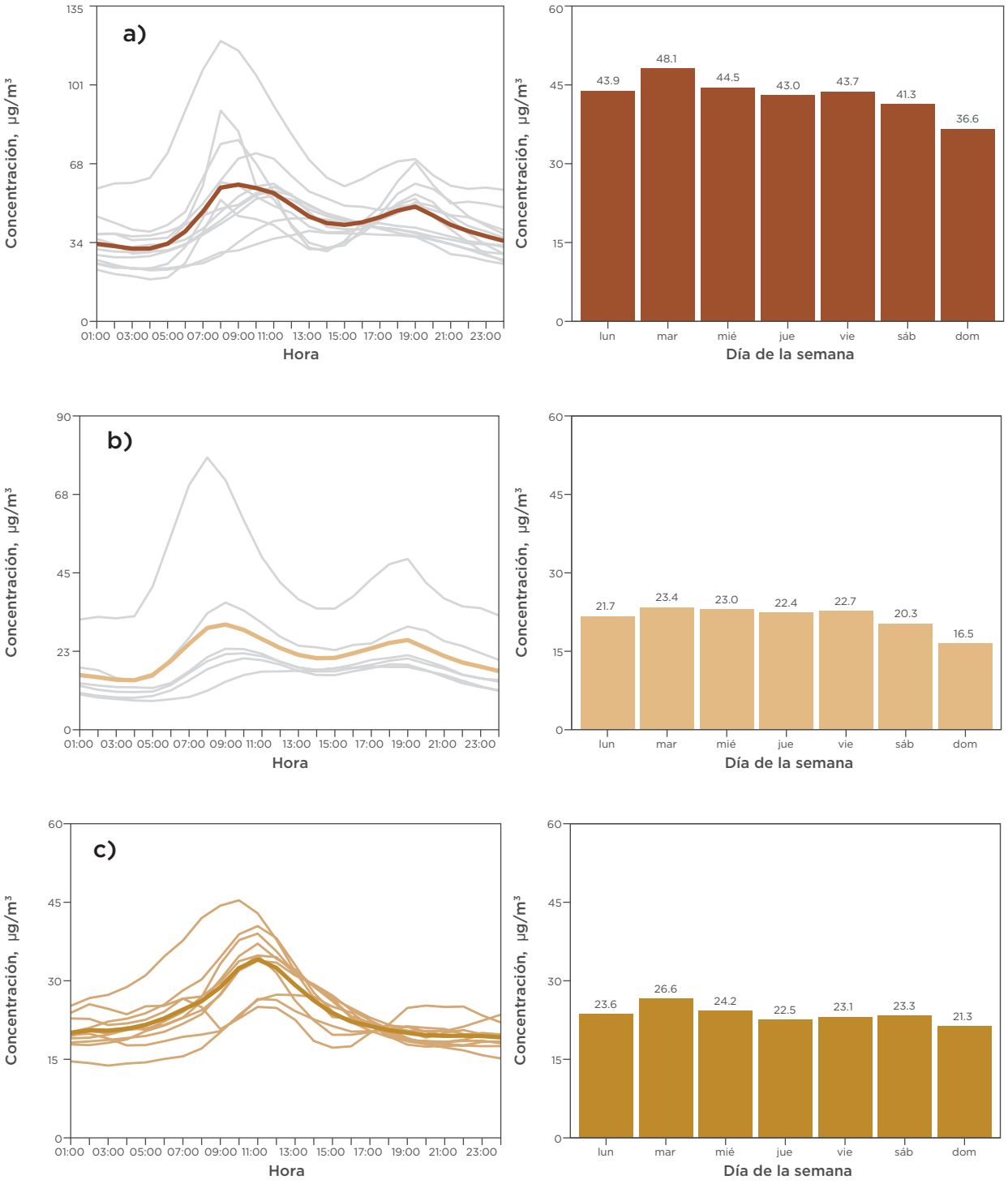


Figura III.17. Comportamiento horario (izquierda), la línea gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas delgadas son el perfil horario de cada sitio de monitoreo. Promedio por día de la semana (derecha) con todas las estaciones. **a)** PM_{10}; **b)** $PM_{10-2.5}$ y **c)** $PM_{2.5}$.

Índice de calidad del aire

El índice de calidad del aire es una herramienta preventiva que sirve para conocer de forma sencilla, clara y oportuna, a través de una escala de valores y colores, los niveles de contaminación del aire, con información sobre el riesgo por la exposición a los contaminantes del aire y las acciones de protección que puede realizar la población.

En 1986, se empezó a difundir oficialmente el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) a través de los medios disponibles de la época, que sustituyó al Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA) el cual inició su publicación diaria el 6 de diciembre de 1977[4]. Actualmente, su difusión se realiza los 365 días del año y las 24 horas, se comunica a través de la radio, medios impresos, televisión, internet, redes sociales y aplicaciones para teléfonos móviles; en la CDMX se cuenta con la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, la cual se actualizó y publicó a finales de 2018 (NADF-009-AIRE-2017, entró en vigor el 1° de enero de 2019), el objetivo de esta norma es establecer los lineamientos que debe cumplir el Índice de Calidad del Aire vigente en 2018.

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) durante 2018 operó con 32 estaciones debido a que, de las 34 que se tenían, dos quedaron fuera de operación por el terremoto de 2017 y fueron reubicadas a finales de este año para comenzar su operación oficial en 2019. El índice solo se reporta con las estaciones que cumplen con el objetivo de monitoreo de "Informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación en zonas representativas y sus posibles riesgos a través del índice de calidad del aire", que en total son 27 estaciones de la RAMA que cumplen con este objetivo, las otras cinco tienen como uno de sus objetivos el de "generar información para la evaluación del transporte de contaminantes urbanos y la evaluación de concentraciones de fondo", y se ubican en los límites de la zona urbana (ACO, INN, MPA, AJU y MON). La principal ventaja del uso del índice, es homologar la concentración de los cinco contaminantes criterio a una sola escala adimensional que comprende el intervalo de 0 a 500 puntos y colores correspondientes a cada categoría; el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana de salud (NOM) para cada contaminante. Con esto, además de tener un índice por contaminante, se pueden comparar sus valores.

El índice se difunde a la población en general para que tomen medidas preventivas y reduzcan su exposición. Cuando se presenten valores altos, las personas susceptibles como los niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias, cardiovasculares, incluso adultos sanos que hacen ejercicio o trabajan al aire libre, deben mantenerse informadas.

La Ciudad de México, desde 2017, además de difundir el índice de forma horaria; también informa a la población sobre los valores esperados durante el día actual y el siguiente, esto se realiza a través del pronóstico de calidad del aire que tiene como finalidad que las personas puedan, desde un día antes, ajustar sus actividades y reducir su exposición a la contaminación; el pronóstico se puede consultar en la página de internet del SIMAT (www.aire.cdmx.gob.mx) y en la aplicación de teléfonos móviles "AIRE".

El análisis del Índice de Calidad del Aire en 2018 (**Figura III.18**), muestra que se registraron 89 días limpios, en los cuales ningún contaminante superó los 100 puntos del Índice; sin embargo,

[4]Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA). Memorándum técnico SMA/DGS AT/02-78.

la mayoría del año se presentó MALA calidad del aire, con 276 días que superaron los 100 puntos, considerando O_3+PM_{10}+$PM_{2.5}$, y se presentaron cuatro eventos con calidad del aire MUY MALA, es decir, con valores mayores a 150 puntos en la escala del Índice, de los cuales tres le corresponden a ozono y uno a PM_{10}. En lo individual el ozono presentó mayor número de días con MALA calidad del aire con un total de 210 días, mientras que PM_{10} registró 185 y 57 para $PM_{2.5}$.

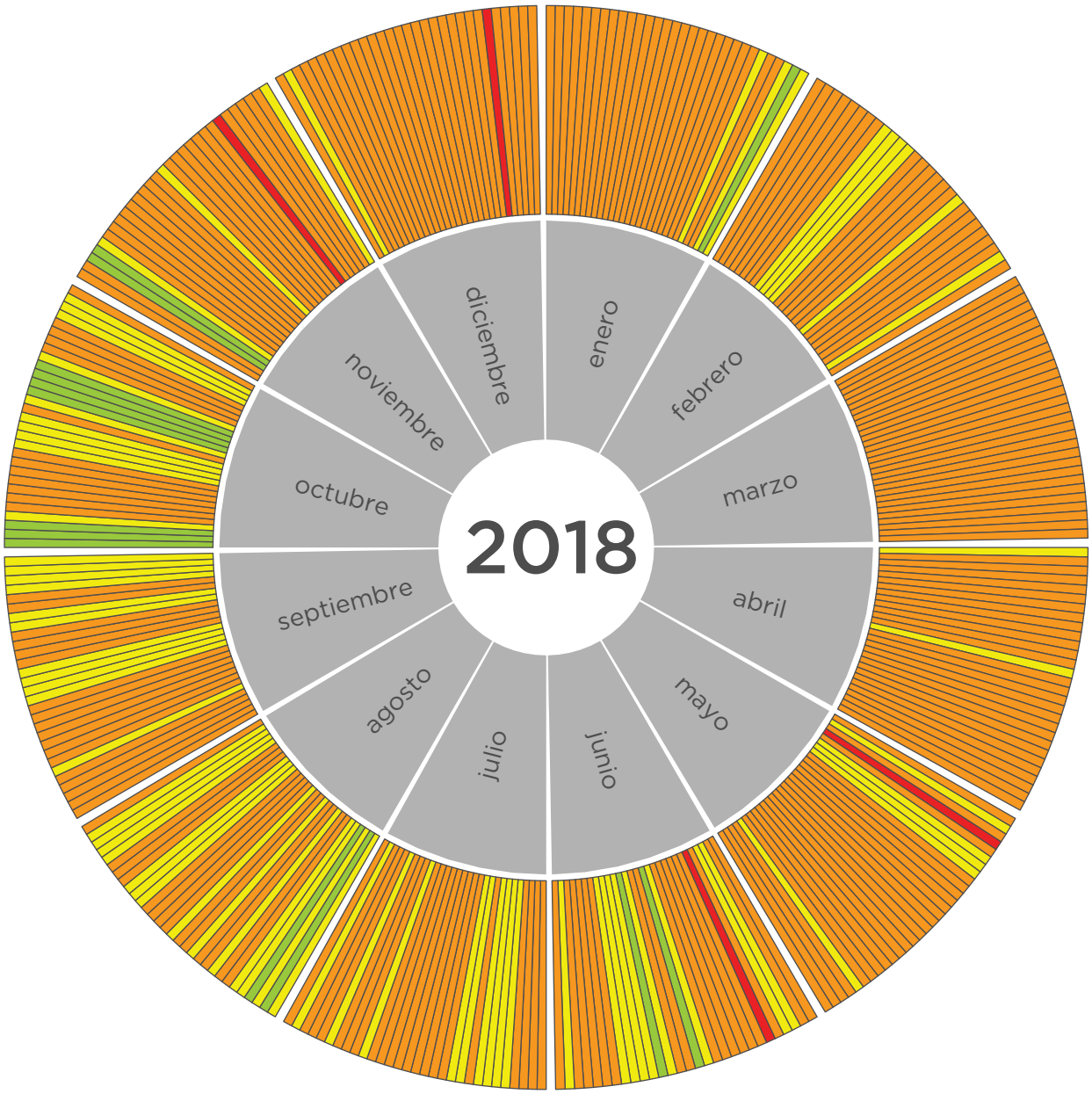


Figura III.18. Comportamiento del Índice de Calidad del Aire para 2018, considerando todos los contaminantes incluido $PM_{2.5}$.

En la **Figura III.19** se presenta el detalle del comportamiento del Índice de Calidad del Aire durante el 2018 de los tres los contaminantes y se puede observar que, el mes de octubre presentó mejor calidad del aire.

El índice de $PM_{2.5}$ se mantuvo en calidad del aire REGULAR en la mayoría del año; sin embargo, durante enero, noviembre y diciembre, se presentaron valores dentro del rango de MALA y alcanzaron valores en la categoría MUY MALA del 25 al 26 de diciembre, debido a la quema de pirotecnia.

En comparación con el 2017 (**Tabla III.1**), los días con MALA calidad del aire disminuyeron en 2018 para los tres contaminantes y en ambas entidades, excepto el caso de O_3 en el Estado de México, el cual tuvo un aumento de 9 días (7.4%) con MALA calidad del aire. La disminución del número de días en 2018 fue ocasionada por los fenómenos meteorológicos locales y a nivel global que favorecieron la dispersión de contaminantes durante el año y que, a su vez, beneficiaron la calidad del aire durante la temporada de ozono, lo que conllevó a que se presentaran pocos eventos de contingencia.

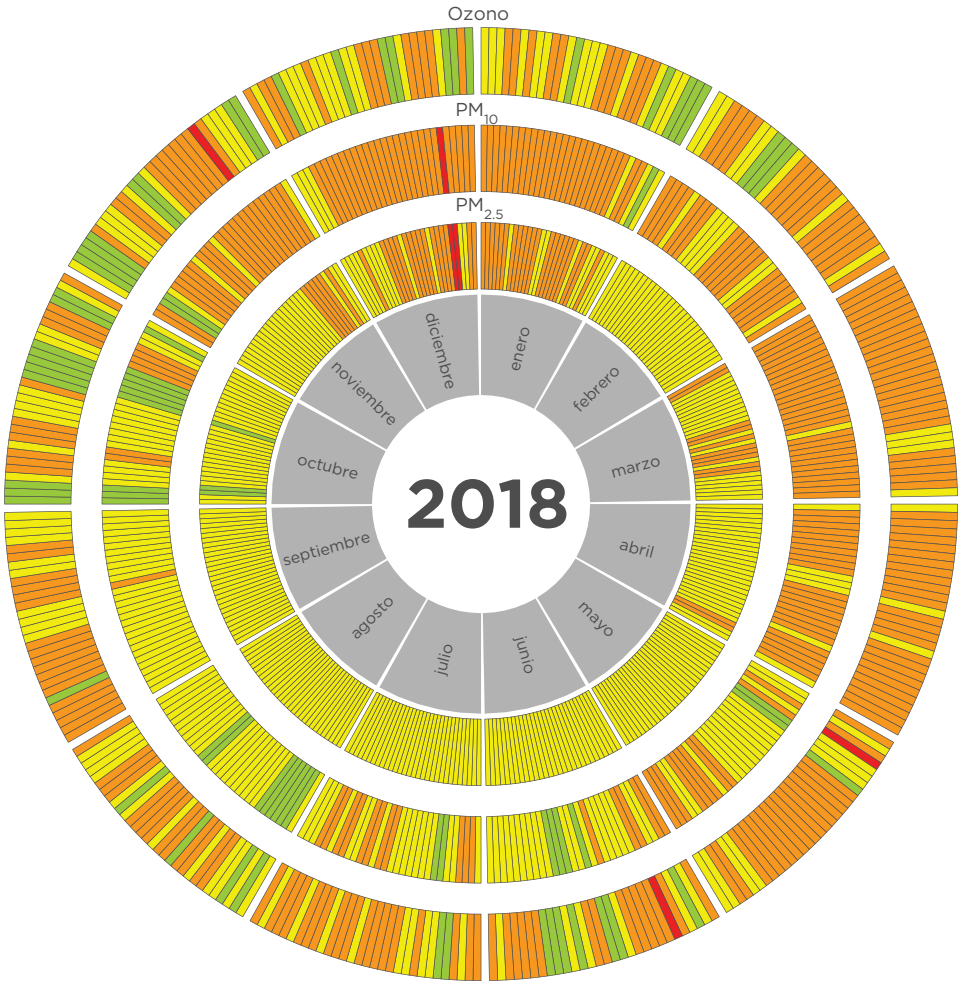


Figura III.19. Comportamiento del índice de calidad del aire por contaminante: O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$ para 2018.

Tabla III.1. Comparación del número de días con valores mayores a 100 puntos del Índice de Calidad del Aire del 2017 al 2018 por contaminante y entidad.

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire MALA		Diferencia de días (2018-2017)	Porcentaje de cambio (%)
		2017	2018		
O_3	CDMX	219	194	-25	-11.4 ↓
	Edo. Méx.	122	131	9	7.4 ↑
PM_{10}	CDMX	106	72	-34	-32.1 ↓
	Edo. Méx.	205	185	-20	-9.8 ↓
$PM_{2.5}$	CDMX	53	32	-21	-39.6 ↓
	Edo. Méx.	95	55	-40	-42.1 ↓

Carbono negro

El carbono negro (o en inglés black carbon) son partículas que contienen carbono elemental casi puro con moléculas de oxígeno e hidrógeno unidos en una estructura hexagonal en varias capas, lo que resulta en una estructura cristalina grafítica heterogénea, sin una forma específica.

El carbono negro puede formarse por carbonización de materia orgánica durante la combustión (partículas de carbón) o por condensación de la fase gaseosa en la quema incompleta de combustibles fósiles, madera y otra biomasa (partículas de hollín[5] – **Figura III.20**). Es la única sustancia común en aerosoles que absorbe fuertemente la luz visible (Andreae, 1995).

Figura III.20. Partículas de hollín

[5]Aglomeración de partículas de carbón impregnadas con alquitrán, formadas en la combustión incompleta de materiales carbonosos.

La combustión completa convierte el carbón presente en los combustibles, en dióxido de carbono (CO_2). En la práctica, la combustión nunca es completa y junto al CO_2, hay formación de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos orgánicos no volátiles que se condensan en forma de carbón orgánico (OC, por sus siglas en inglés) y aerosol de carbono negro (CN). La mezcla compleja de partículas resultante de la combustión incompleta es usualmente denominada hollín, aunque todavía no hay un nombre universalmente aceptado. La diferencia entre OC incoloro y CN se define de forma operacional. En realidad, muchas sustancias orgánicas, por ejemplo, sustancias húmicas[5], sí tiene un color y contribuye al OC de acuerdo con las mediciones con métodos de absorción de luz (Andreae y Gelencsér, 2006). Los COV emitidos por la combustión incompleta cuando son transportados en la atmósfera, se transforman químicamente en productos condensables y forman los aerosoles orgánicos secundarios (AOS), los cuales son incoloros (UNEP y WMO, 2011).

Un aspecto importante del carbono negro es la absorción de la luz visible en todas las longitudes de onda. Esto hace que absorba un millón de veces más energía por unidad de masa que el CO_2, el cual solo absorbe en determinadas longitudes de onda, sin embargo, el impacto neto del carbono negro sobre el clima depende de otros factores, lo cual incluye, su ciclo de vida que puede ser de días a semanas, su gran variabilidad geográfica y temporal relacionada con las fuentes de emisión, además el CN tiene múltiples interacciones con las nubes que puede provocar calentamiento o enfriamiento, así como efecto en la precipitación. El carbono negro contribuye al derretimiento acelerado de nieve/hielo y reduce su reflectividad al oscurecer la nieve y el hielo, lo que aumenta el calentamiento global. Es uno de los tres compuestos con mayor contribución al calentamiento global después del CO_2 y metano (CH_4), estas características se describen en el estudio de Forster et al. (2007).

Una implicación importante sobre el carbono negro es su fuerte capacidad de absorción y su corta vida atmosférica, esta combinación puede resultar que al aplicar estrategias de control para reducir el carbono negro, su concentración en la atmósfera disminuirá inmediatamente y conllevará beneficios sobre el clima. El potencial de respuestas climáticas a corto plazo (una década) es uno de los puntos más fuertes que consideran los científicos sobre el carbono negro. Los esfuerzos para reducir las emisiones de carbono negro pueden detener inmediatamente su efecto sobre la temperatura, la nieve, el hielo y la precipitación. Esto significa que las reducciones de carbono negro pueden tener un beneficio rápido e importante para desacelerar la tasa de cambio climático a corto plazo, especialmente para regiones vulnerables como el Ártico y los Himalayas (US EPA, 2012).

En cuanto al impacto del carbono negro en la salud, los estudios de cohortes que se han desarrollado muestran la asociación que tiene sobre la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar en una exposición de largo plazo; sin embargo, estos estudios no son concluyentes. Con respecto a los estudios a corto plazo sobre los efectos en la salud, sugieren que el carbono negro es un mejor indicador de sustancias peligrosas que provienen de las fuentes de combustión (especialmente tráfico) que la información proporcionada por la masa de las

[5]Las sustancias húmicas (HULIS) son un grupo complejo de compuestos orgánicos de peso molecular relativamente alto que contribuyen considerablemente a la masa de carbono orgánico (OC) e influyen en las propiedades de absorción de la luz de los aerosoles.

partículas en general. La revisión de los estudios toxicológicos disponibles no muestra que el carbono negro sea un componente directamente tóxico, pero actúa como un portador universal de diversas sustancias dañinas, con los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los metales pesados, las especies más frecuentes en los estudios de enfermedades cardiovasculares y efectos cancerígenos de partículas finas y/o carbono negro. Actualmente, se desconoce si el impacto en la salud de la exposición a carbono negro difiere, cualitativa o cuantitativamente, del impacto de las partículas finas. El número de estudios sobre los efectos en la salud ocasionados por el carbono negro y partículas finas es limitado. Sin embargo, la reducción en la exposición a las $PM_{2.5}$ que contienen carbono negro y otros compuestos relacionados con la combustión, debe conducir a una reducción en los efectos a la salud asociados a las partículas finas (OMS, 2012).

En esta sección se presentan los resultados del análisis de carbono negro en las muestras de $PM_{2.5}$ de 2018. Las muestras de 24 horas se colectaron cada seis días de acuerdo con el calendario de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA). Se utiliza el término carbono negro equivalente (CNe) para reportar la concentracion de acuerdo con lo recomendado por Petzold et al., 2013, para mediciones con métodos ópticos. Los resultados se reportan en $\mu g/m^3$ a las condiciones locales de presión y temperatura.

La concentración promedio del CNe determinado en las muestras de 24 horas de $PM_{2.5}$ fue de 2.8 $\mu g/m^3$ (mediana=2.4 $\mu g/m^3$). Este promedio fue menor por 0.1 $\mu g/m^3$ al registrado en 2017 de 2.9 $\mu g/m^3$. Como se puede observar en la **Figura III.21**, el mayor promedio anual se registró en la estación Xalostoc (XAL) con un valor de 4.5 $\mu g/m^3$, este sitio registró también la concentración máxima para el promedio de 24 horas con 14.5 $\mu g/m^3$ el día 22 de diciembre, cercano a las festividades de fin de año donde se acostumbra la quema de pirotecnia. La estación Pedregal (PED), localizada al sur de la Ciudad de México, reportó el menor promedio anual 1.6 $\mu g/m^3$ este valor es idéntico al que se obtuvo en 2017. El análisis de CNe se realizó como se describe en la sección correspondiente del Informe 2015 (SEDEMA, 2016).

Al analizar la distribución de la concentracion por sitio de monitoreo, se mantiene el comportamiento registrado desde 2015 con la estación Xalostoc (XAL) con los valores máximos, seguido por Tlalnepantla (TLA), Merced (MER), San Agustín (SAG), UAM-Iztapalapa (UIZ) y Pedregal (PED). La estación XAL ubicada en el corredor industrial de Ecatepec, presenta la mayor variabilidad en sus registros con un rango intercuartil[6] de 2.39 $\mu g/m^3$, y la menor dispersión se presenta en PED con 0.83 $\mu g/m^3$ localizada al suroeste de la Ciudad, como se observa en la **Figura III.21a.** Ese mismo comportamiento lo muestra la proporción de $CNe/PM_{2.5}$ (**Figura III.21b**).

En las series de tiempo para CNe, $PM_{2.5}$ y el cociente $CNe/PM_{2.5}$ (**Figura III.22**) se observa un patrón estacional con los máximos en la temporada seca y los valores mínimos en la temporada de lluvia (julio-octubre), y es agosto el mes con la menor concentración de CNe y $PM_{2.5}$. Para la relación de $CNe/PM_{2.5}$ no se observa una diferencia clara durante los meses. En la temporada seca fría (noviembre a febrero), las condiciones de estabilidad atmos-

[6]Es la diferencia entre el tercer cuartil y el primer cuartil de una distribución. Es una medida de dispersión estadística, cuanto mayor es el rango más disperso están los datos de un conjunto.

férica, bajas temperaturas, la disminución en la altura de la capa de mezcla y el aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie, favorecen que los contaminantes queden atrapados en la capa cercana al suelo y se pueden incrementar los niveles de contaminantes primarios como el CNe. La reducción en la concentración del CNe en agosto con un promedio 1.73 µg/m^3, podría estar vinculada a que, en este mes, se presentó el máximo de precipitación acumulada en el año, con 198.2 mm, ocasionado por el mayor número de ciclones tropicales registrados, 14 ondas tropicales y la interacción de la corriente en chorro subtropical, que provocó la entrada de humedad. En el mes de marzo se observan algunos muestreos con altas concentraciones que pueden relacionarse con fuentes

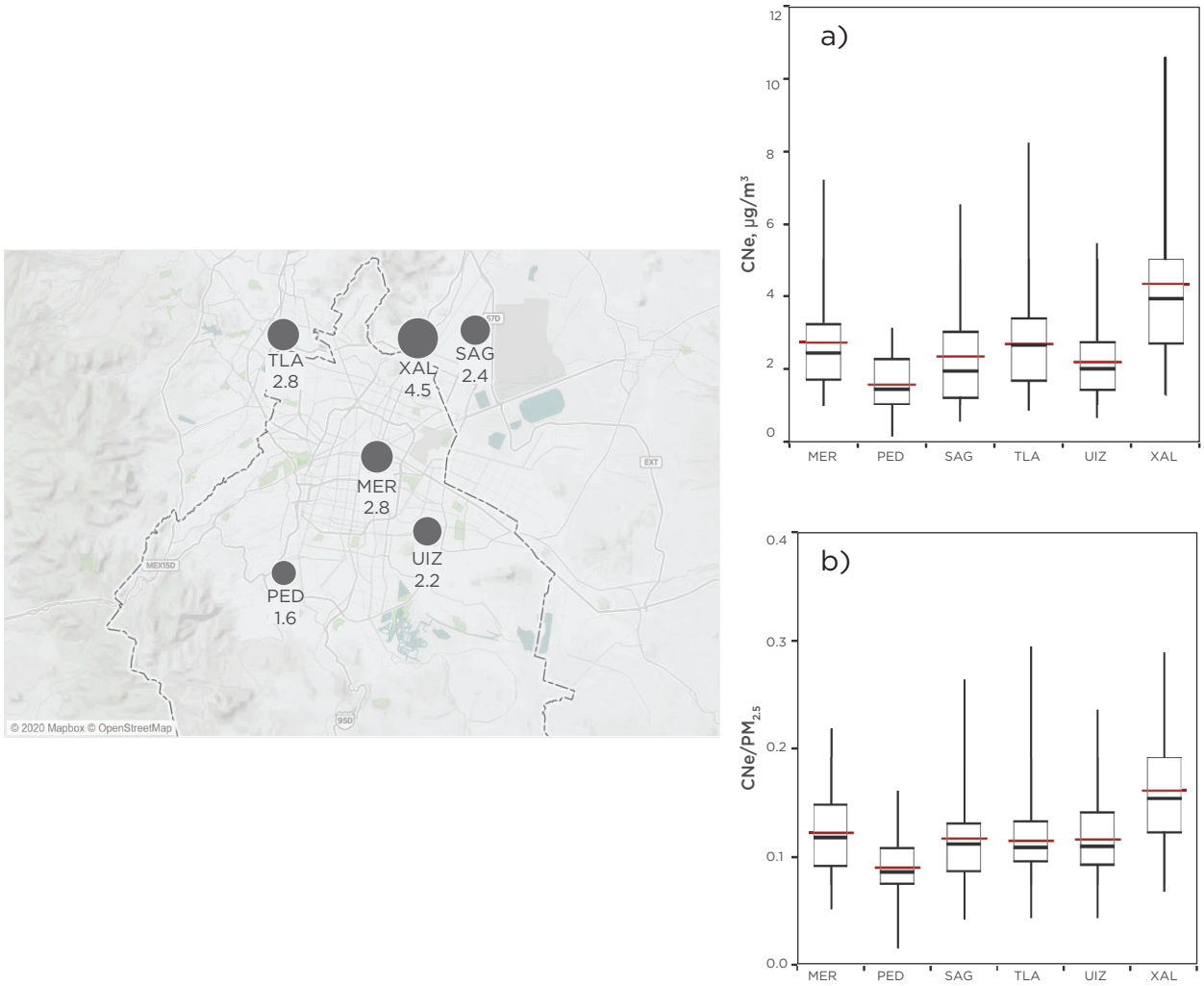


Figura III.21. Promedio anual por estación de monitoreo para carbono negro equivalente (izquierda). A la derecha se presenta la distribución de la concentración de 24 h de **a)** CNe y **b)** Proporción de CNe/$PM_{2.5}$; por sitio de monitoreo. La línea roja representa el promedio aritmético, la caja corresponde al percentil 75 y 25, la línea negra dentro de la caja es la mediana, los bigotes representan el mínimo y el máximo.

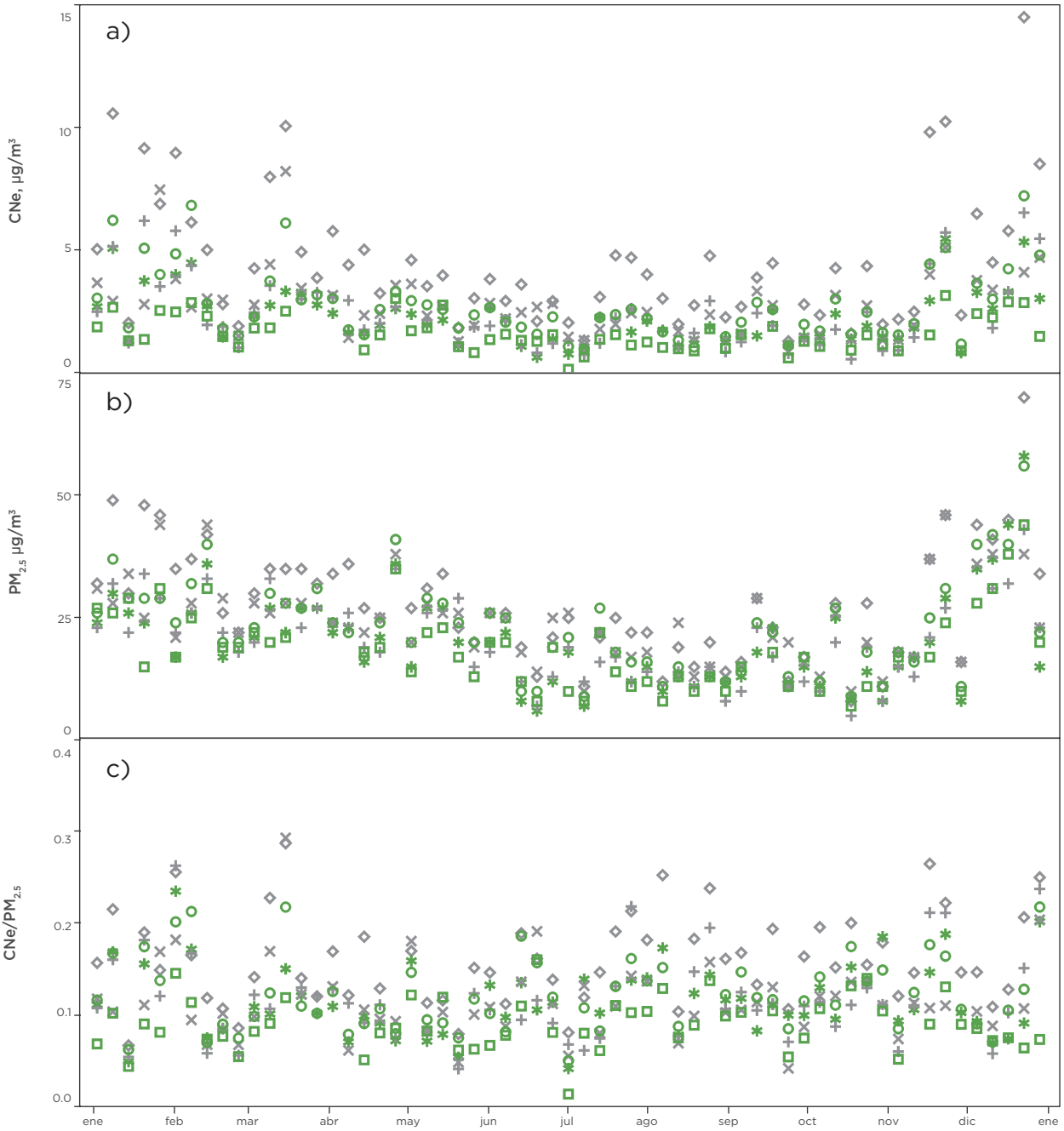


Figura III.22. Promedio de 24 horas de la concentración de **a)** CNe, **b)** $PM_{2.5}$ y **c)** la proporción de CNe/$PM_{2.5}$; por estación de monitoreo. En el gráfico se presentan en color verde las estaciones que están ubicadas en la Ciudad de México, mientras que el color gris representa a los sitios localizados en la zona conurbada del Estado de México.

regionales, como la contribución de las emisiones producidas por los incendios forestales en los estados del oeste y sur del país.

La proporción entre la concentracion de CNe y de $PM_{2.5}$ ([CNe]/[$PM_{2.5}$]), corresponde a la contribución del componente a la masa total de partículas finas. El promedio de CNe a la masa total de las $PM_{2.5}$ se ha reportado desde 2015 con un valor del 11%; en 2016 con el 12%; durante 2017 fue del 12%, y en este año el promedio de la fracción del CNe contribuyó con el 11%, como se observa no hay variación entre los años y es congruente con lo reportado en otros estudios realizados en la ciudad en las campañas realizadas en 2003 y 2006. En la **Figura III.23**, se observa la fracción de CNe en $PM_{2.5}$ por estación, con el mayor aporte en XAL

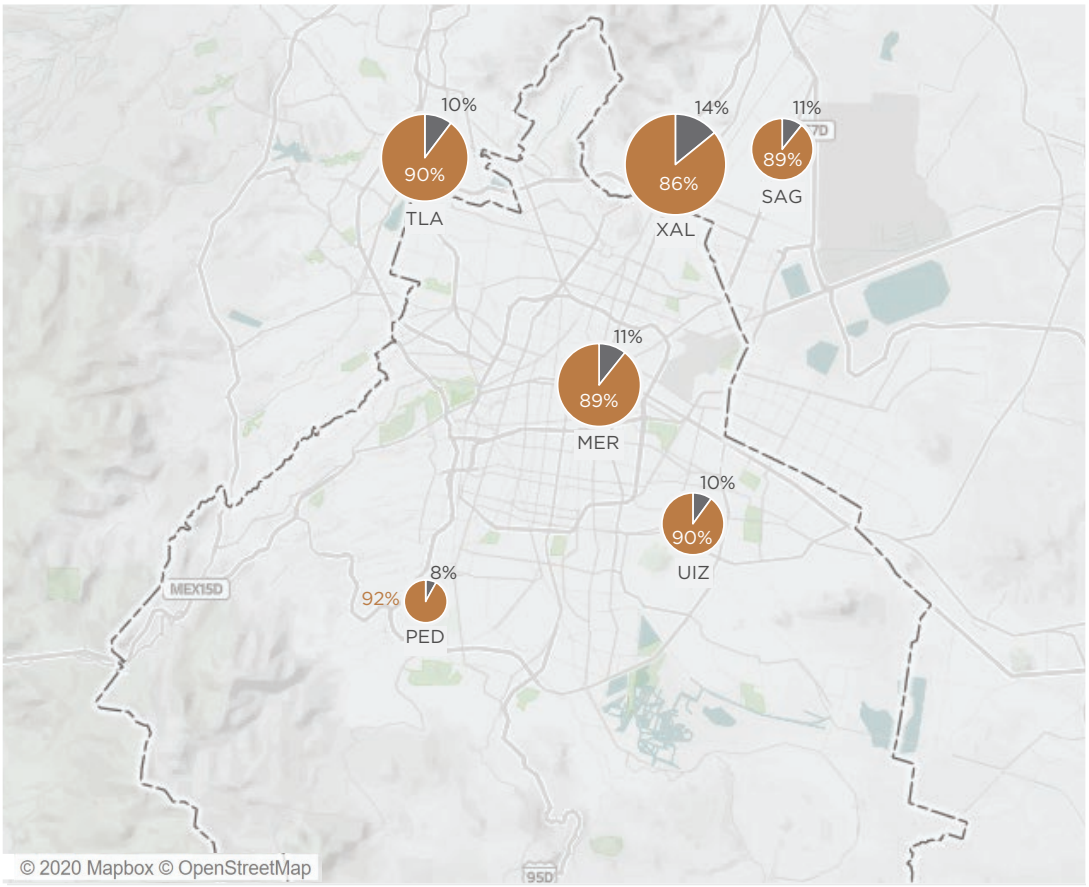


Figura III.23. Distribución espacial de la contribución promedio anual del carbono negro equivalente (CNe) a la concentración total de $PM_{2.5}$, por estación de monitoreo.

con 14% y el menor en PED con el 8%, para las estaciones de MER y SAG es del 11%, un punto menor en los sitios TLA y UIZ con el 10%.

La mayor fracción se localiza en la estación XAL debido a que este sitio se encuentra dentro del corredor industrial de Xalostoc, y cerca de la

vía Morelos y la Autopista México-Pachuca, las cuales transitan vehículos de carga, transporte de pasajeros y vehículos particulares. Como se ha mencionado en los Informes anteriores, el carbono negro es emitido principalmente por la combustión incompleta de diésel, es lógico que en dicha estación se encuentre la mayor proporción de carbono negro con respecto a las $PM_{2.5}$ porque ambas vialidades presentan un tránsito vehicular alto durante todo el día.

En las estaciones en las que se miden otros contaminantes como gases y partículas, se realizó un análisis de correlación para identificar si tienen fuentes de emisión en común, para ello se correlacionó con el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno que tienen una fuerte asociación con las emisiones vehiculares. En la **Figura III.24**, se muestran estas correlaciones del promedio de CNe con el promedio de 24 horas del monóxido de carbono (R^2=0.76) y con los óxidos de nitrógeno (R^2=0.77) con una fuerte asociación entre ambos contaminantes y el CNe, lo que confirma que la principal fuente es de emisiones vehiculares. En este año no se registran datos atípicos debido a que los muestreos de cada 6 días no coincidieron con fechas festivas de fin de año, en el que se observa el impacto de pirotecnia, y similar al 2017 se presenta una pequeña diferencia en la proporción del CO y NOx con respecto al CNe, lo que puede indicar una fuente distinta de emisión.

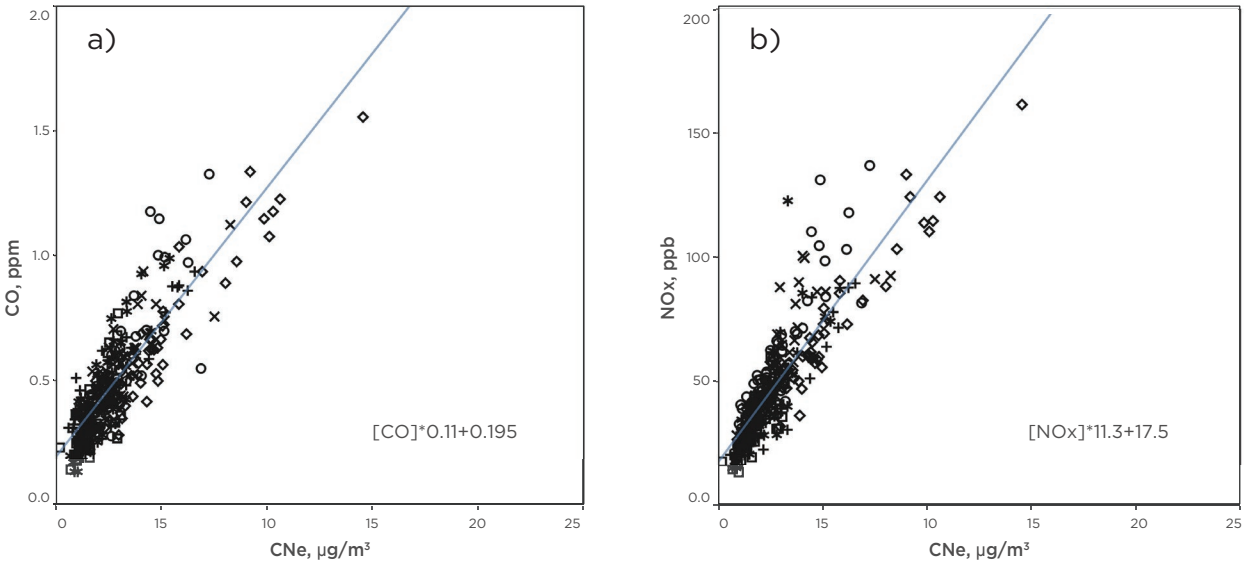


Figura III.24. Correlación entre la concentración de CNe y el promedio de 24 horas de **a)** monóxido de carbono (CO) y **b)** óxidos de nitrógeno (NOx) para las diferentes estaciones de monitoreo.

Tendencias

La tendencia, en términos de calidad del aire, se puede definir como el desplazamiento gradual de la concentración de los contaminantes a través de los años, esta puede presentar una dirección de ascenso o descenso, lo cual sirve para evaluar el impacto de programas y políticas públicas. El análisis de la tendencia de los contaminantes en la ZMCM, nos indica un cambio en la concentración a través de los años, así como determinar patrones de comportamiento de los contaminantes, ya sea estacional o cíclico, o por el contrario, se pueden observar comportamientos aleatorios los cuales no presentan un patrón específico en el transcurso del tiempo.

En estas tres décadas que el SIMAT ha operado, se observa como la instrumentación de los programas de gestión de la calidad del aire han tenido un impacto en la reducción de la contaminación. La concentración de Plomo (Pb), SO_2, CO y NO_2 muestran una reducción significativa, y registran valores por debajo de los límites actuales de las Normas Oficiales Mexicanas en salud ambiental (NOM). Sin embargo, para el caso de O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$, presentan un decremento en su concentracion, sin lograr alcanzar los valores límite de sus respectivas normas. A partir de 2005, se observa una tendencia constante para O_3 y un comportamiento aleatorio en partículas, mientras que desde 2015 se ha observado un ligero incremento en los tres contaminantes.

Con el objetivo de mostrar el porcentaje de cambio en la concentración de cada contaminante, así como su tendencia a través del tiempo, se consideró como año base 1995, debido a que se encontró que, a partir de este año, las estaciones históricas cuentan con datos consistentes. Los sitios de monitoreo que se consideraron para el análisis tienen registros desde el año base de cada contaminante y son: Atizapán (ATI), Camarones (CAM), Cuajimalpa (CUA), FES-Acatlán (FAC), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Merced (MER), Montecillo (MON), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), Tláhuac (TAH), Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), UAM-Iztapalapa (UIZ), Villa de las Flores (VIF) y Xalostoc (XAL). Es importante mencionar que no todas se utilizaron para todos los contaminantes debido a que no los miden.

Todos los contaminantes presentan decrementos, como se mencionó anteriormente, y la magnitud de estos en 2018 es la siguiente: CO y SO_2, presentan el máximo porcentaje de reducción con 78 y 67%, respectivamente. Mientras que los contaminantes con menor reducción para el último año son PM_{10}, $PM_{2.5}$ y NO_2 con 16%, 9% y 12%, respectivamente. El O_3 presenta una reducción hasta 2004, un ligero incremento en 2005 y a partir de 2006 se observa una estabilidad con porcentajes de reducción que oscilan entre 34 y 39%, estadísticamente no significativa. En 2018 todos los contaminantes registran un decremento en comparación con 2017 como se observa en la **Figura III.25**.

Las gráficas de series de tiempo históricas presentan los promedios mensuales de cada contaminante de 1995 a 2018, la desviación estándar, y la línea del ajuste de tendencia que utiliza el método LOESS[7]. Como lo muestra la línea de ajuste, prácticamente todos los contaminantes, con excepción de CO, presentan una tendencia estable en los últimos años.

Se puede observar que la tendencia en la reducción ha sido consistente con la aplicación de medidas de disminución de emisiones y programas de calidad del aire, ya que desde finales de la década de los noventas se presentan reducciones en la mayoría de los contaminantes (**Figuras III.26** a **III.33**).

[7]La regresión de Loess es una técnica no paramétrica que utiliza la regresión ponderada local para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión. Las curvas de loess pueden revelar tendencias y ciclos en los datos que pueden ser difíciles de modelar con una curva paramétrica.

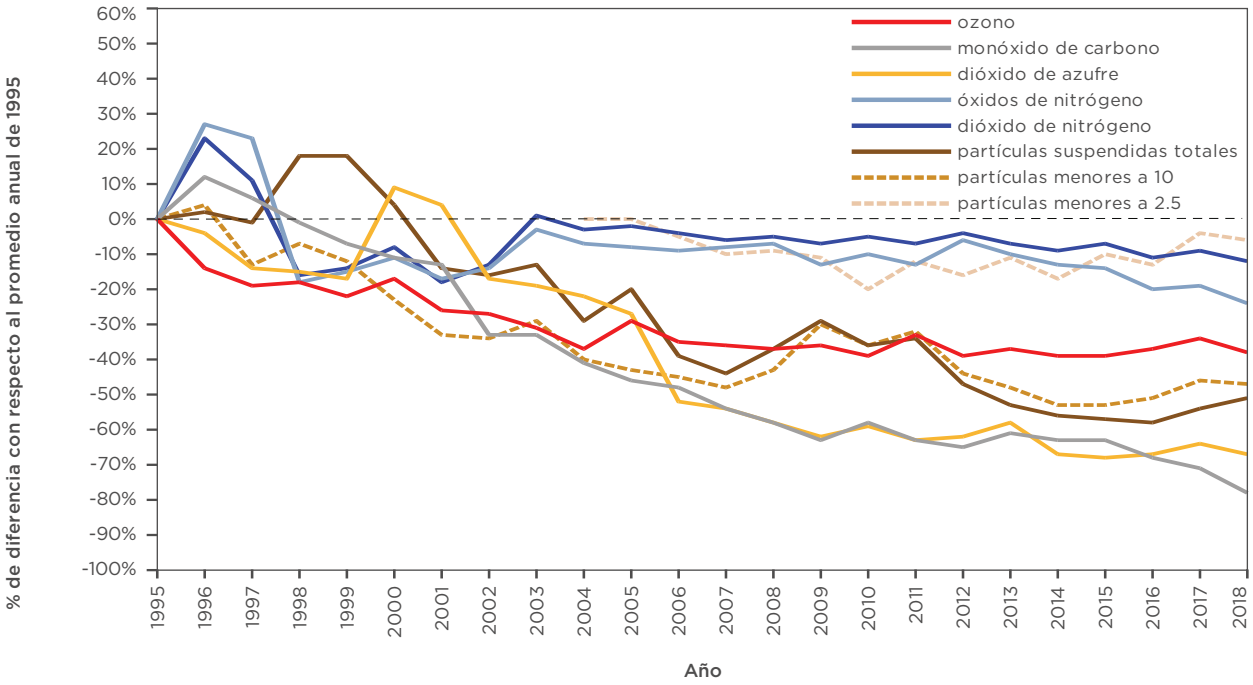


Figura III.25. Porcentaje de diferencia del promedio anual con respecto al promedio del año 1995 para cada uno de los contaminantes del aire. Para $PM_{2.5}$ se utiliza como referencia el promedio anual de 2004.

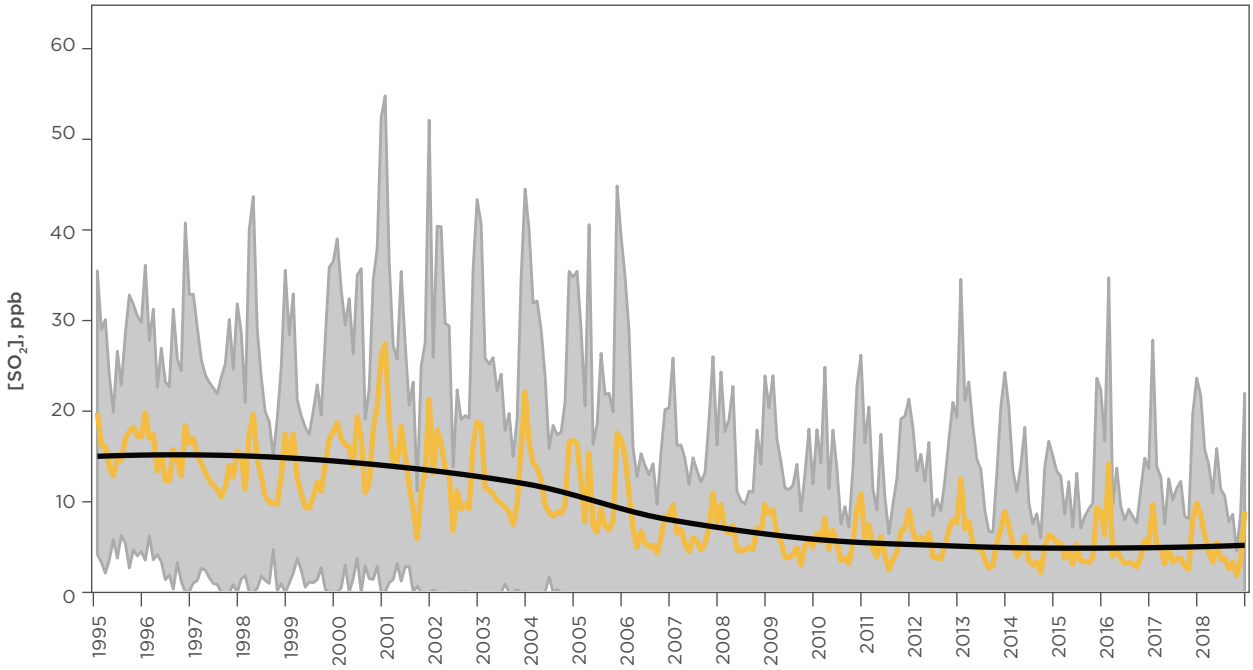


Figura III.26. Serie de tiempo con los promedios mensuales de dióxido de azufre para el período 1995-2018. La línea amarilla corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

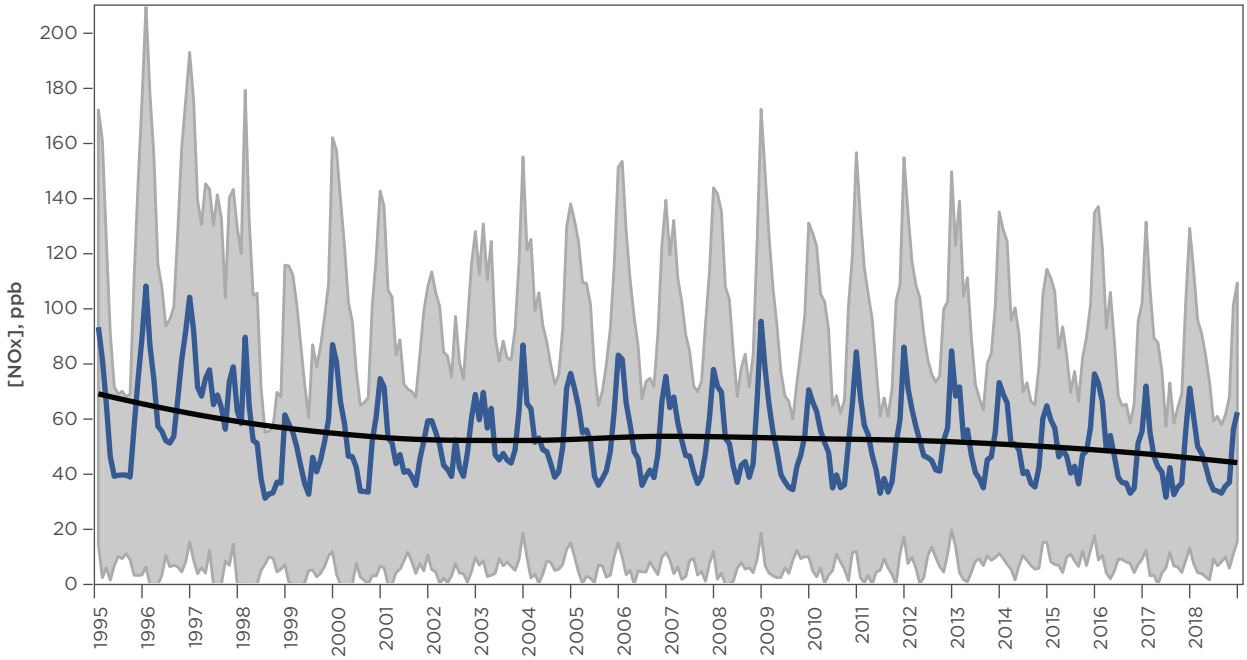


Figura III.27. Serie de tiempo con los promedios mensuales de óxidos de nitrógeno para el período 1995-2018. La línea azul oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

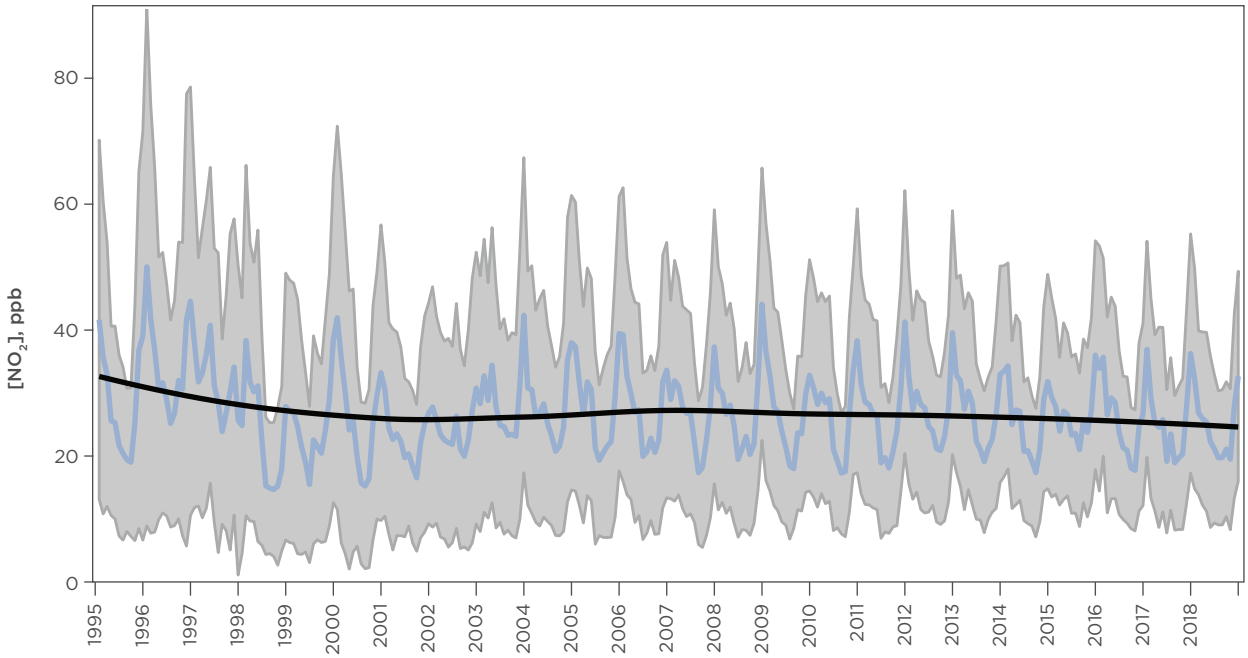


Figura III.28. Serie de tiempo con los promedios mensuales de dióxido de nitrógeno para el período 1995-2018. La línea azul claro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

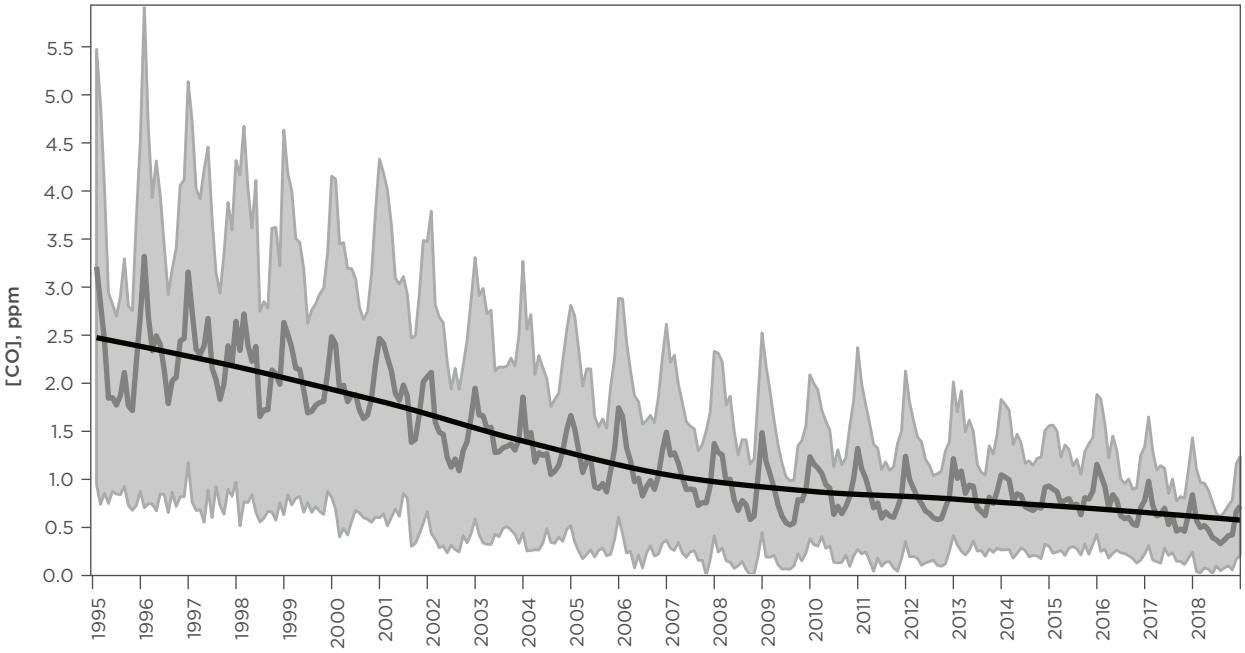


Figura III.29. Serie de tiempo con los promedios mensuales de monóxido de carbono para el período 1995-2018. La línea gris oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

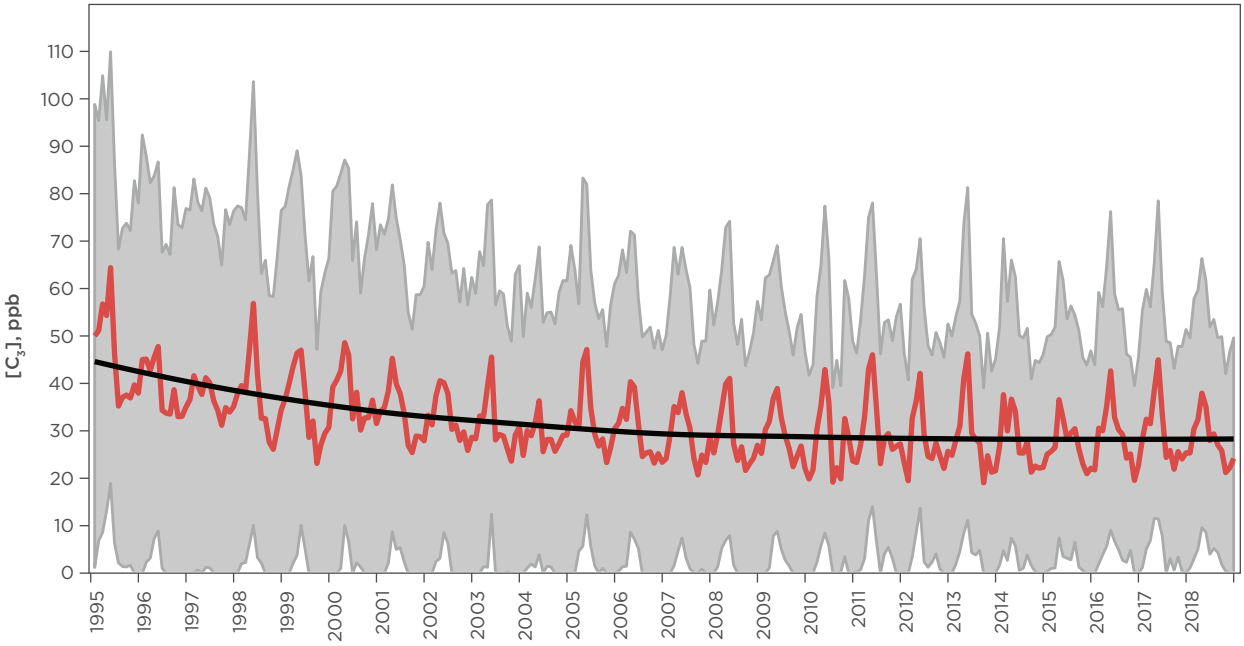


Figura III.30. Serie de tiempo con los promedios mensuales de ozono para el período 1995-2018. La línea roja corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

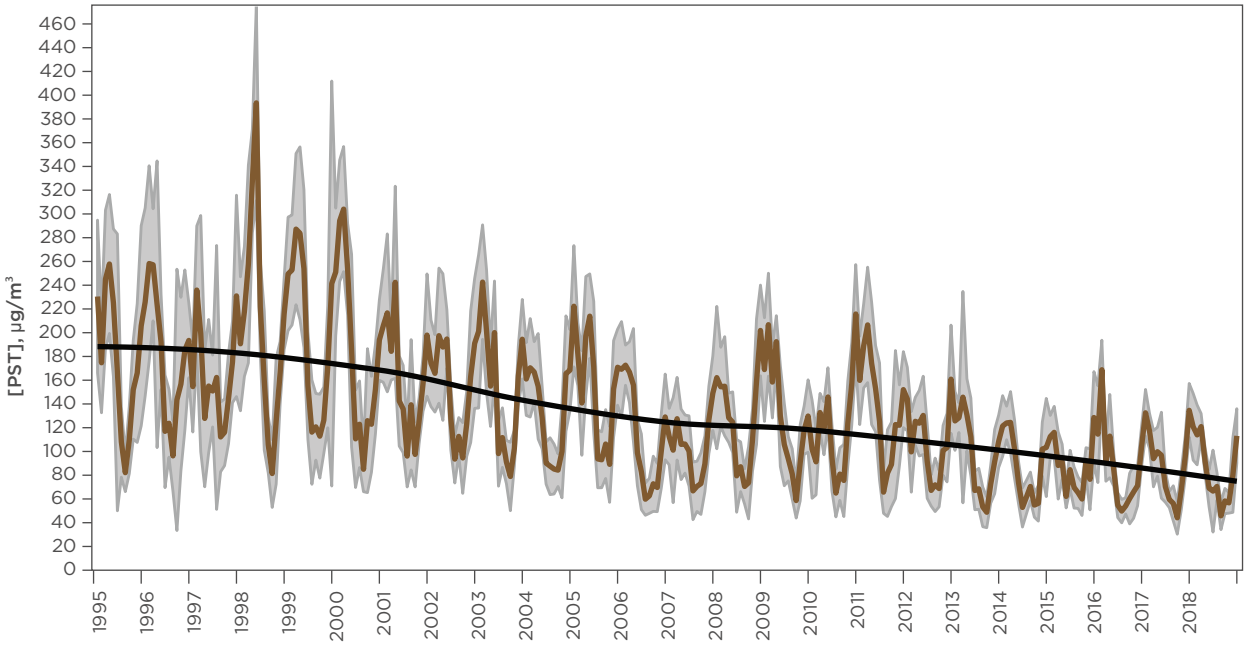


Figura III.31. Serie de tiempo con los promedios mensuales de partículas suspendidas totales para el período 1995-2018. La línea café oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

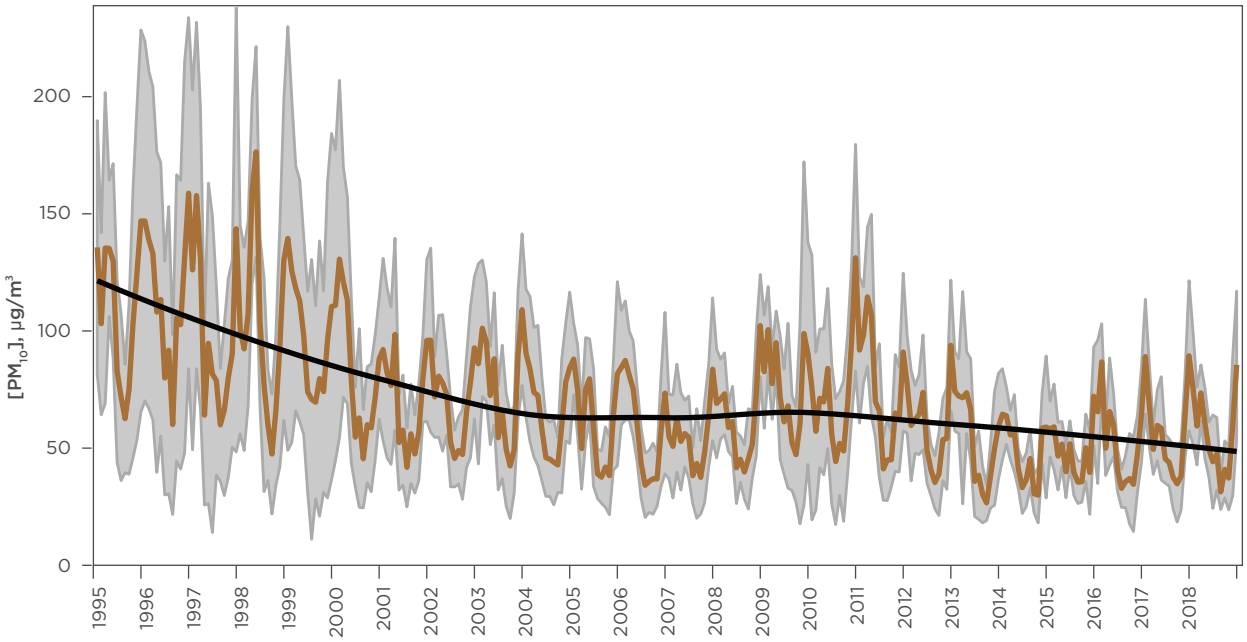


Figura III.32. Serie de tiempo con los promedios mensuales de partículas menores a 10 µm para el período 1995-2018. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

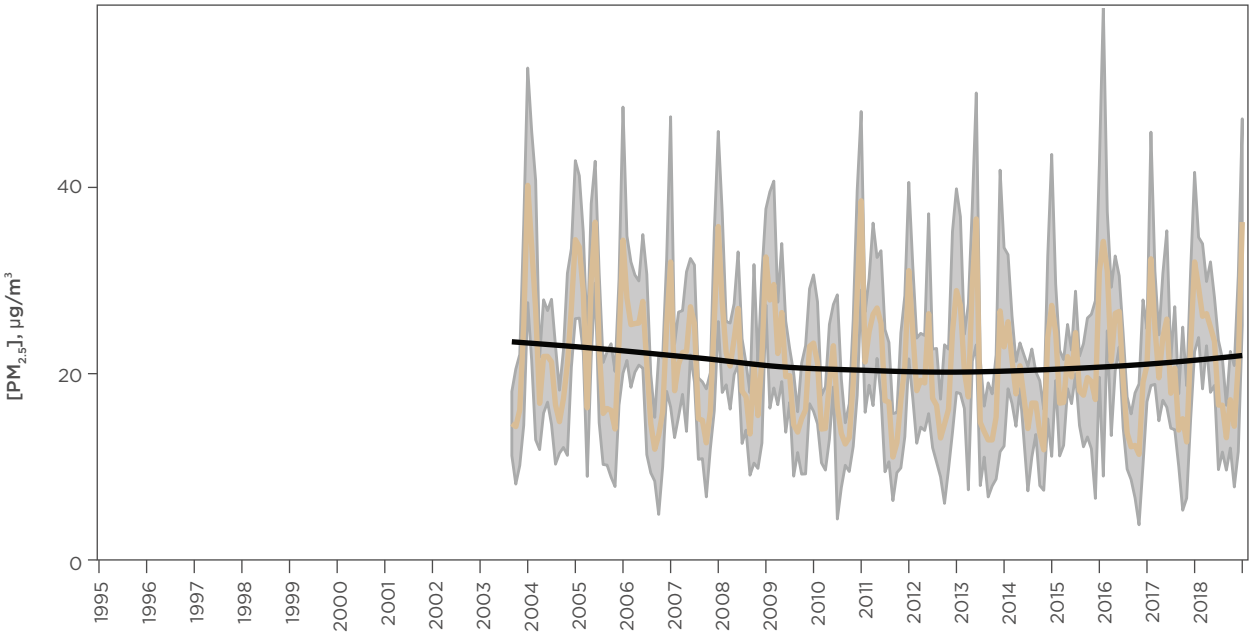


Figura III.33. Serie de tiempo con los promedios mensuales de partículas menores a 2.5 µm para el período 1995-2018. La línea café claro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio, la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

4

EVENTOS DE ALTA CONCENTRACIÓN DE OZONO Y PARTÍCULAS

Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Los programas de contingencia ambiental atmosférica tienen como finalidad, a nivel mundial, reducir la exposición de la población a valores altos de contaminación para protegerla de posibles efectos adversos en su salud. Estos programas, en algunas de sus fases solo son preventivos donde se exhorta la participación de la población para que tome medidas de protección. Cuando este evento, en el caso de la Ciudad de México y municipios conurbados del Estado de México, alcanza valores por arriba de los 150 puntos del Índice de calidad del aire, se informa a la población sobre las medidas preventivas y las acciones para reducir la emisión de los contaminantes, con la finalidad de que mejore la calidad del aire. Es importante mencionar que la información sobre la calidad del aire se reporta diariamente cada hora, a través de un índice cuya finalidad principal es comunicar a la población sobre el nivel de contaminación en cierta región, cada valor cuenta con recomendaciones y posibles riesgos a la salud asociados. Los programas de contingencia deben ser temporales y con la finalidad de reducir a corto plazo las emisiones que generan la contaminación, para disminuir el riesgo de exposición de la población a valores extraordinarios.

En la ZMCM se cuenta con el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) desde 1986. El PCAA considera dos fases para la aplicación de acciones inmediatas para reducir emisiones de las principales fuentes de contaminación, para evitar un agravamiento de un episodio, no se considera como una herramienta de gestión para el control de emisiones a largo plazo, debido a que solamente atiende a episodios específicos de alta contaminación.

El año 2018 históricamente presentó el menor número de episodios de contingencias, ya que sólo se activó la Fase I del PCAA en dos ocasiones, la primera se declaró para toda la ZMCM, el 6 de junio correspondiente a O_3, al suroeste de la zona metropolitana y el segundo evento fue la Fase I de activación regional que ocurrió durante el 25 de diciembre, correspondiente a PM_{10} en el noreste de la ZMCM (**Tabla IV.1**).

Tabla IV.1. Eventos de activación de contingencias en 2018 (Índice Calidad del Aire ≥151).

Contingencia	Fecha de activación	Índice de Calidad del Aire	Concentración	Estación	Fecha de desactivación	Índice de Calidad del Aire	Concentración
Fase I de O_3	6 junio	161	163 ppb	Pedregal (PED)	07 de junio	144	147 ppb
Fase I PM_{10}	25 diciembre	152	218 µg/m^3	Villa de las Flores (VIF)	26 de diciembre	113	110 µg/m^3

Es importante mencionar que, aunque solamente se activó un episodio de contingencia por ozono, durante el año se registraron un total de tres eventos con valores mayores a 155 ppb, dos de ellos durante la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio), mismos que no cumplieron con las consideraciones para declarar una contingencia de acuerdo al programa vigente (**Tabla IV.2**).

Tabla IV.2. Días con alta concentración de ozono (≥155ppb).

Fecha	Concentración y estación registrada	Observaciones
4 mayo	179 ppb – HGM	No se activa PCAA
6 junio	163 ppb – PED	Activación Fase I PCAA
23 noviembre	157 ppb – PED	No se activa PCAA

Evento de concentración alta por O_3: 4 de mayo

El 4 de mayo, se presentó el primer evento de alta concentración de ozono en el año, el cual fue consecuencia de una fuga de hidrocarburos en el municipio de Acolman, Estado de México. Un día antes, el jueves 3 de mayo a las 07:20 h se reportó una fuga de gasolina de un ducto de PEMEX en las instalaciones que se encuentran en el poblado de Totolcingo, Municipio de Acolman, la fuga alcanzó más de 20 metros de altura y como consecuencia de la evaporación del combustible, se incrementó la concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). La fuga del combustible fue controlada por las autoridades federales a las 09:00 h del 3 de mayo, sin embargo la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), emitió un comunicado con la advertencia de la posibilidad de que los niveles de ozono se incrementarían. El impacto en la concentración de O_3 se observó al día siguiente, el viernes 4 de mayo, debido a que se reforzó el sistema de alta presión presente durante la semana y se incrementó la estabilidad atmosférica, que ocasionó acumulación de los precursores de ozono y provocó altas concentraciones del contaminante en este día. La Fase I del PCAA no fue declarada debido a que, al día siguiente, el pronóstico de meteorología y calidad del aire indicaba condiciones favorables para la dispersión de contaminantes.

El comportamiento de la concentración máxima de ozono por hora del día muestra que los valores de O_3 se incrementaron desde las 12:00 h (**Figura IV.1**), lo cual representa el patrón normal del ozono por la actividad fotoquímica, sin embargo, a las 13:00 h se rebasó el valor de la norma en 10 estaciones de monitoreo, con una concentración máxima de 133 ppb en la estación Gustavo A. Madero (GAM). A las 14:00 h, el número de estaciones con un valor de concentración mayor a 95 ppb aumentó a 16, con una concentración máxima de 151 ppb en Gustavo A. Madero (GAM). Los valores más altos se alcanzaron a las 15:00 h en varias estaciones del centro, en Benito Juárez (BJU), Hospital General de México (HGM), Iztacalco (IZT) y Merced (MER) con valores de 156, 179, 169 y 158 ppb, respectivamente, esto debido al estancamiento de los contaminantes provocado por la baja ventilación, con una velocidad de viento de 2 m/s en todas las estaciones. A las 16:00 h, la concentración descendió considerablemente debido a un incremento de la ventilación proveniente del noroeste de la ciudad que desplazó las masas del viento hacia la zona sur, lo que ocasionó que ya sólo cuatro estaciones rebasaran el valor límite de la norma (>95 ppb) con una concentración máxima de 120 ppb en Milpa Alta (MPA). La concentración de O_3 continuó en descenso y a las 18:00 h se rebasó el valor normado en una sola estación (Ajusco Medio, AJM) con 98 ppb. Finalmente, a las 19:00 h todas las estaciones se encontraban por debajo de los 100 puntos del índice. Los vientos dominantes en las horas previas al máximo de ozono (10:00 a 15:00 h) fueron provenientes del norte y noreste de la ZMCM, además se presentó viento de sur a norte procedente de la zona del Ajusco y de Chalco, lo que ocasionó formación de zonas de convergencia en el centro y sur, así mismo, las montañas al sur y suroeste de la ciudad que funcionaron como una barrera natural que evitó la dispersión de los contaminantes (**Figura IV.2**).

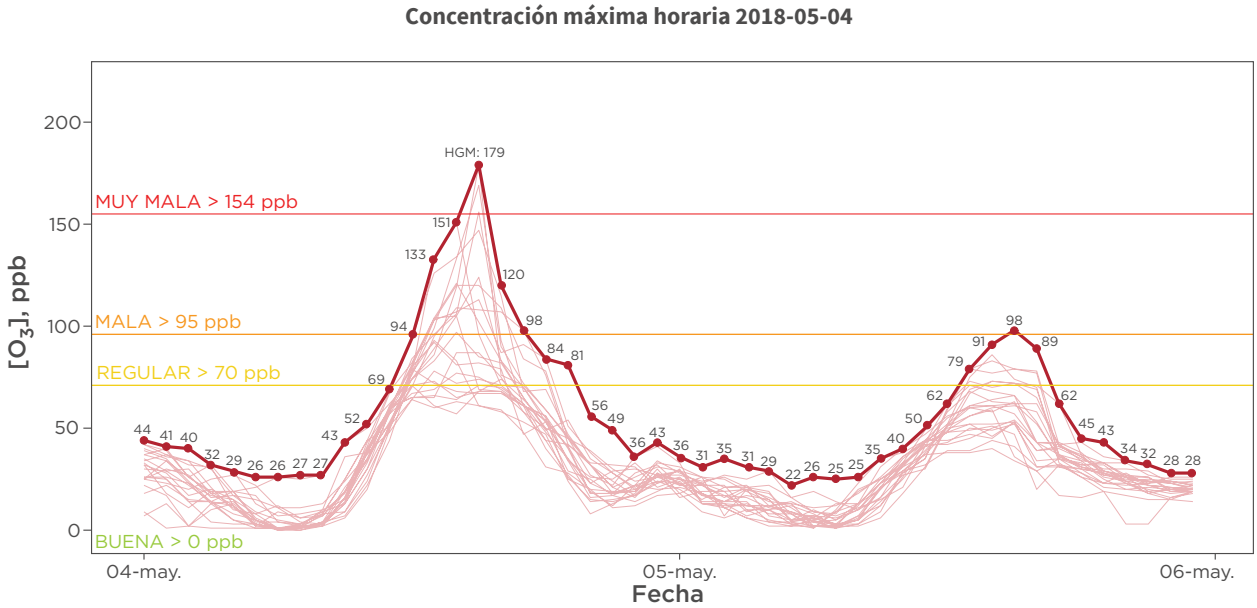


Figura IV.1. Promedio horario de la concentración de ozono del 4 al 5 de mayo de 2018. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en las diferentes estaciones de monitoreo, la línea gruesa resalta los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales representan las categorías del índice.

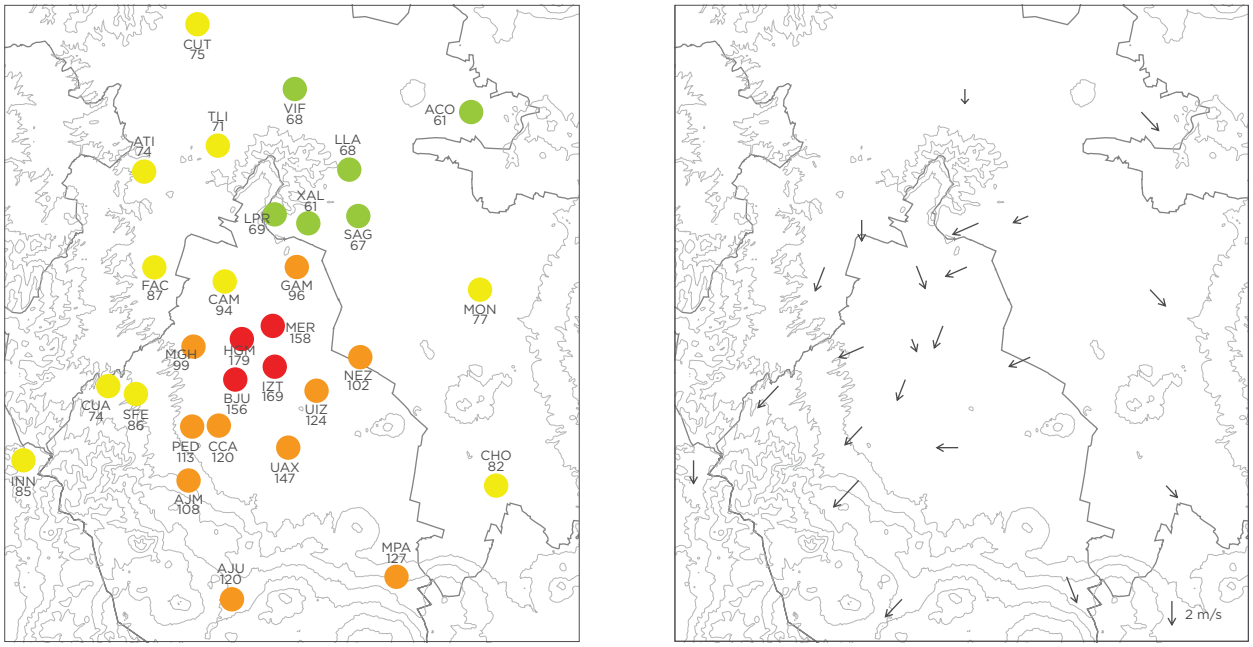


Figura IV.2. Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se muestra la categoría del índice (color) y la concentración en ppb en cada estación para el 4 de mayo a las 15:00 h. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 10:00 y 15:00 h.

Activación Fase I por O_3: 6 de junio

El 6 de junio, en las horas previas al máximo de ozono (10:00 a 15:00 h), la dirección y velocidad del viento ocasionó zonas de convergencia en el centro y suroeste de la ZMCM, el viento dominante provenía del noreste en dirección suroeste, adicionalmente la zona montañosa que rodea el sur de la ciudad que forma una barrera natural, provocó el estancamiento de las masas por lo que se presentó el máximo en la zona suroeste, en la estación Pedregal (PED). El comportamiento de la concentración máxima de ozono y los patrones de viento durante el episodio de contingencia (**Figura IV.3**), inició en el noreste de la ciudad a las 12:00 h, con un registro máximo de 98 ppb en la estación Gustavo A. Madero (GAM); a las 13:00 h permanece en esa zona y se presenta un máximo de 126 ppb en la misma estación, para esta hora, en nueve estaciones de la ZMCM ya se registran valores con mala calidad del aire; a las 14:00 h, la masa de aire se desplaza hacia la zona centro, con una concentración máxima de 150 ppb en la estación Hospital General de México (HGM) junto con otras 14 estaciones que ya registraron mala calidad del aire. En la siguiente hora, la masa de aire continua su movimiento hacia el suroeste de la ZMCM, donde se presenta el valor máximo del día, con 163 ppb en la estación Pedregal (PED), a esta hora, otras 15 estaciones también registran mala calidad del aire. Debido a las condiciones meteorológicas adversas para la dispersión de los contaminantes que indicaba el pronóstico meteorológico y de calidad del aire para el siguiente día, la CAME activó el PCAA para la Fase I por ozono. En las siguientes tres horas (16:00 - 18:00 h), se registraron concentraciones con mala calidad del aire en 13, 9 y 4 estaciones, respectivamente y en estas horas, la estación Pedregal registró el máximo con 149, 130 y 104 ppb, respectivamente.

Estos valores altos fueron ocasionados por temperaturas elevadas y radiación solar intensa, características de la temporada, aunado a esto, se presentó un sistema de alta presión en el centro del país, el cual se fortaleció durante el día y en consecuencia se registraron vientos débiles en superficie, intensa estabilidad atmosférica y escasa dispersión de contaminantes.

Al día siguiente, 7 de junio, aproximadamente a las 16:00 h, la CAME suspendió la Fase I de Contingencia debido a que el sistema de alta presión que afectaba el centro del país se debilitó durante la noche, lo cual provocó un aumento en la velocidad de los vientos en la superficie, por lo tanto, se presentaron condiciones favorables para la dispersión de contaminantes. El 7 de junio se registró una concentración máxima de 146 ppb en la estación de Benito Juárez (BJU) a las 14:00 h (**Figura IV.4**).

Evento de concentración alta por O_3: 23 de noviembre

El 23 de noviembre, fue el último evento del año con alta concentración de O_3 y se consideró atípico debido a que se presentó fuera de la temporada de ozono y en un mes que normalmente presenta valores altos de partículas a causa de las inversiones térmicas, sin embargo, las condiciones meteorológicas así como la influencia de un sistema de alta presión que afectó el centro del país en los días previos, generó estabilidad atmosférica, poca formación de nubosidad y una radiación solar persistente, lo que ocasionó estancamiento de los precursores y favoreció la formación de O_3. En la **Figura IV.5** se observa la evolución de la concentración máxima de ozono en el transcurso del día, a las 14:00 h se registró mala calidad del aire en 12 estaciones de monitoreo con un máximo de 118 ppb en Ajusco Medio (AJM). En la siguiente

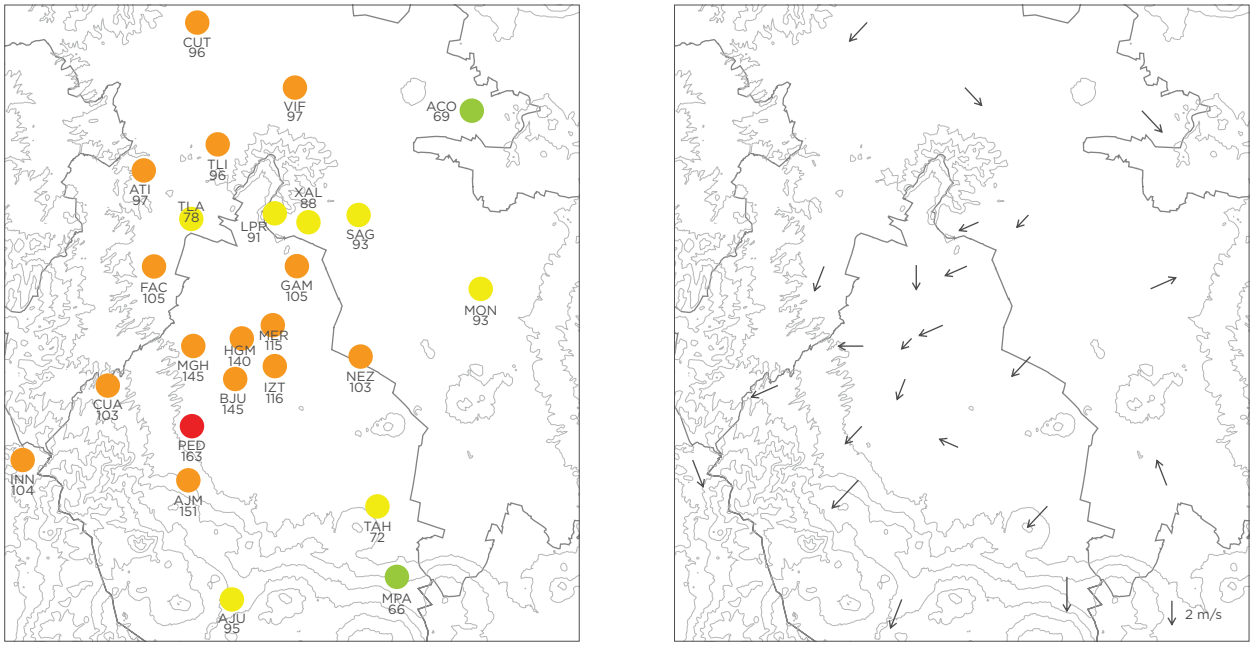


Figura IV.3. Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se muestra la categoría del índice (color) y la concentración en ppb en cada estación para el 6 de junio a las 16:00 h. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 11:00 y 16:00 h.

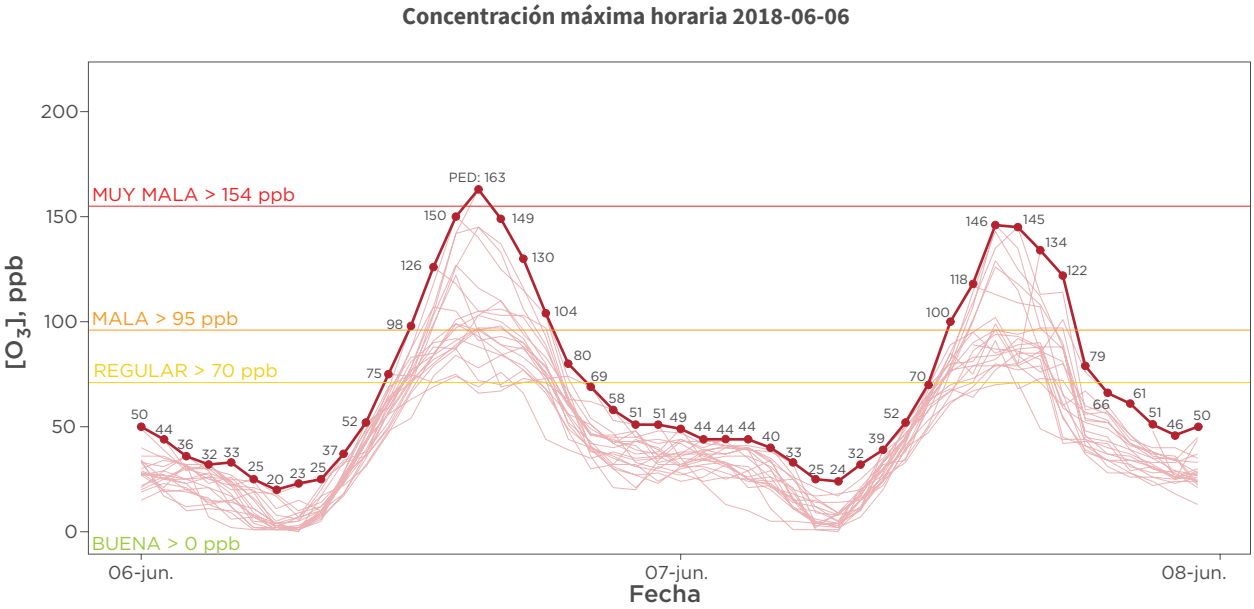


Figura IV.4. Promedio horario de la concentración de ozono del 6 al 7 de junio de 2018. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en las diferentes estaciones de monitoreo, la línea gruesa resalta los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales representan las categorías del índice.

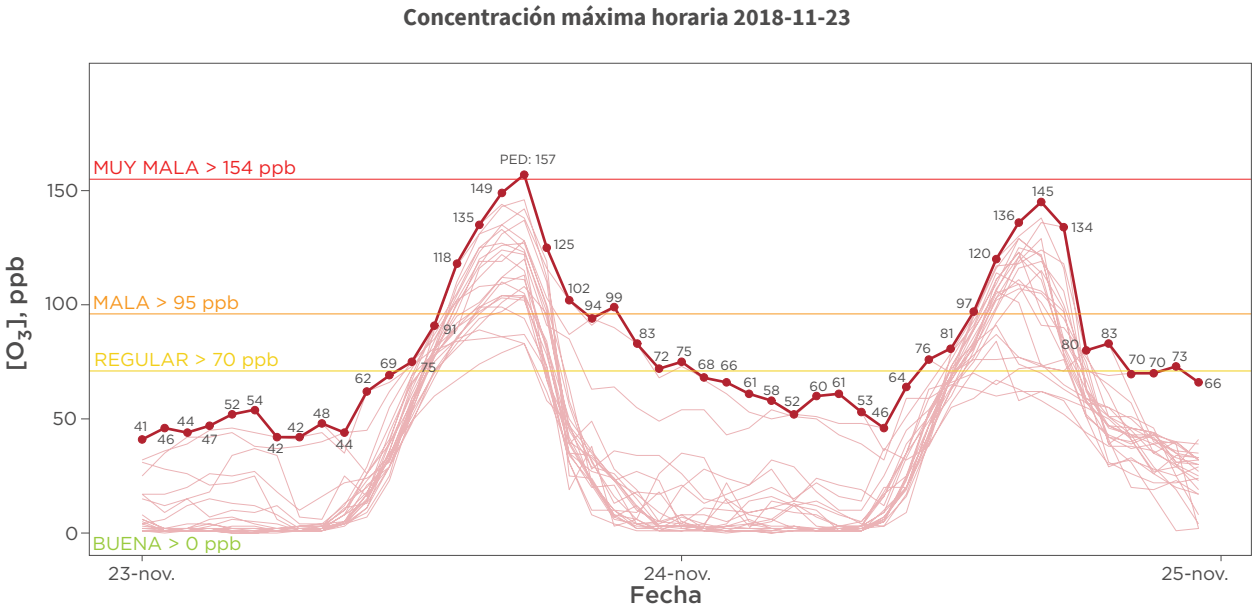


Figura IV.5. Promedio horario de la concentración de ozono del 23 al 24 de noviembre de 2018. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en las diferentes estaciones de monitoreo, la línea gruesa resalta los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales representan las categorías del índice.

hora aumentó a 23 el número de estaciones con mala calidad del aire y nuevamente se presentó el máximo en AJM con 135 ppb. A las 16:00 h, se presentaron valores que exceden la norma en 26 estaciones, con un máximo de 149 ppb en Pedregal (PED). En la siguiente hora (17:00 h) el número de estaciones arriba de 95 ppb disminuyó a 24 y se rebasó el valor de la Fase I del PCAA (≥155 ppb) en la estación PED, sin embargo, no se activó la contingencia debido a que las concentraciones descendieron, y las condiciones meteorológicas fueron favorables para la dispersión en este día y el siguiente. Finalmente, a las 18:00 h el valor máximo fue de 127 ppb en PED (**Figura IV.5**).

Se puede observar que los vientos dominantes en las horas previas al máximo de ozono (12:00 a 17:00 h) provenían del noreste, por lo que el máximo de ozono se presentó en el suroeste donde son comunes las zonas de convergencia de vientos en el centro y sur, debido a las montañas al sur y suroeste de la ciudad, ver (**Figura IV.6**).

Un análisis de la tendencia del número de días con valores mayores o iguales a 155 ppb en concentración de ozono desde 1990 al 2018 muestra que, en este último año, se registró el menor número de días arriba del valor de Fase I del PCAA actual (**Figura IV.7**). El mes de mayo usualmente registra los valores máximos de ozono, sin embargo, en 2018 alcanzó el menor número de horas con concentración superior al límite de la NOM para el promedio horario desde 1990. En esta ocasión, el mes de mayo registró solamente un evento con concentración superior a 154 ppb, lo que es compara-

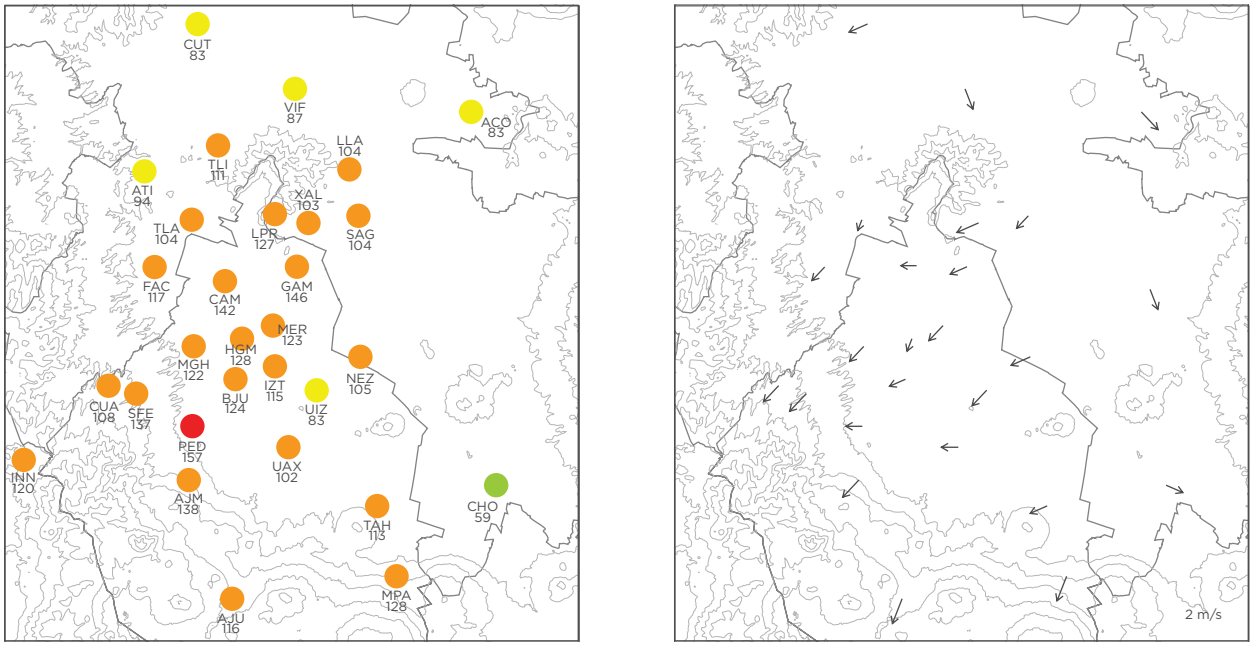


Figura IV.6. Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se muestra la categoría del índice (color) y la concentración en ppb en cada estación para el 23 de noviembre a las 17:00 h. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 12:00 y 17:00 h

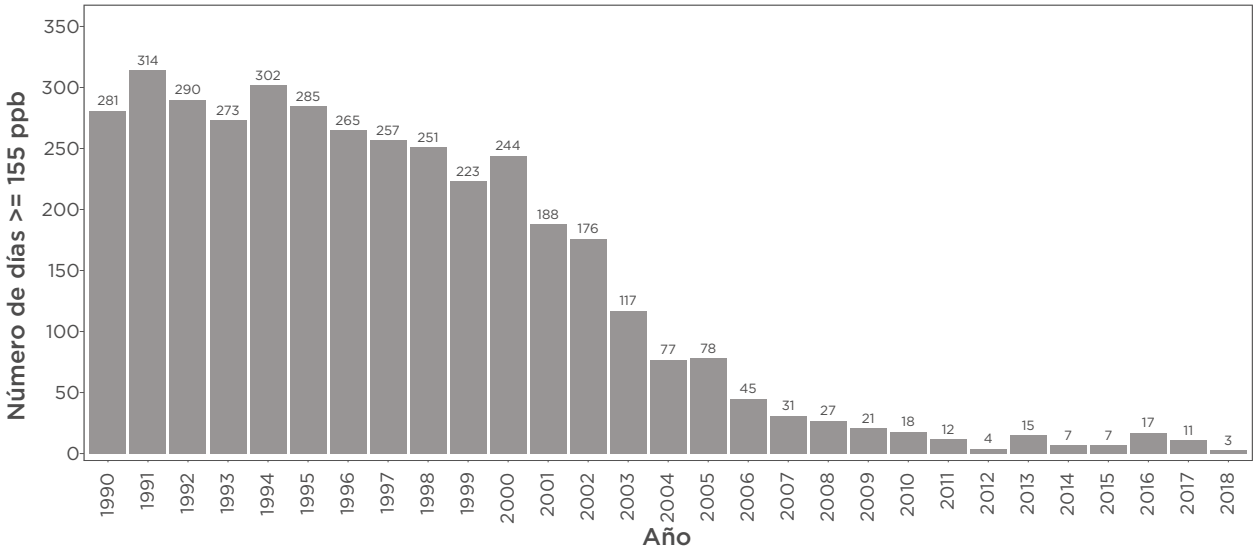


Figura IV.7. Número de días con concentración de ozono mayor o igual a 155 ppb.

ble con mayo del 2012 cuando las condiciones meteorológicas también fueron favorables para la mejora de la calidad del aire (SEDEMA, 2017).

Los sistemas meteorológicos que fueron predominantes en el centro del país durante la primera parte del año como la condición de la Niña que fue débil durante los dos primeros meses del año y de marzo a mayo se convirtió en un escenario de transición, esto provocó que los sistemas frontales asociados a este fenómeno incrementaran la precipitación en los meses de abril y mayo con un 3% por arriba del promedio histórico, estos fueron los factores más importantes para que, durante la temporada de ozono del 2018, se presentaran pocos eventos de alta concentración y de activación de contingencias, esto en comparación a las condiciones meteorológicas adversas que usualmente se presentaron en los años anteriores.

Esta reducción en el número de eventos se debió a los fenómenos globales que afectaron el país y que ocasionaron la presencia de mayor precipitación acumulada en el periodo de febrero a junio, que en comparación con el 2017, abril presentó la mayor diferencia de precipitación acumulada debido a que en 2017 se registró un valor de 12.9 mm mientras que en abril del 2018 se elevó hasta 44.5 mm, lo cual representa aproximadamente 3.5 veces el valor del año anterior, mientras que el mes con mayor precipitación acumulada en 2018 fue junio con 127.4 mm (SMN, 2018a). Durante la temporada de ozono, a nivel de superficie se observaron flujos de viento predominantes del norte en las horas previas a las concentraciones máximas de ozono, lo cual favoreció la dispersión de los precursores y evitó mayor formación del contaminante.

Activación Fase I Regional por PM_{10}: 25 de diciembre

La mayoría de los episodios de alta concentración de PM_{10} se registran durante la temporada seca-fría, también llamada temporada de partículas (noviembre a febrero). Sin embargo, en el año sólo se activó la Fase I Regional del PCAA en una ocasión. El evento de contingencia fue provocado por la presencia de un sistema de alta presión en el centro del país, lo cual favoreció la estabilidad atmosférica reflejada en viento débil y baja dispersión de contaminantes. Además, durante la noche del 24 y la madrugada del 25 de diciembre, se presentó inversión térmica que, junto con las actividades de festejos por la fecha, se liberaron emisiones adicionales generadas por uso de pirotecnia, fogatas y quemas a cielo abierto que incrementaron los niveles de contaminación por PM_{10} en toda la zona norte y centro del Valle de México. Cabe mencionar que esta situación es recurrente en la región norte de la ZMCM.

La evolución de la concentración y del índice de calidad del aire para partículas durante el 24 y 26 de diciembre se observa en la **Figura IV.8**. Las siguientes estaciones registraron los máximos horarios: Iztacalco (IZT) ubicada en el centro y registró un valor máximo de 292 µg/m^3, Xalostoc (XAL) con 319 µg/m^3, San Agustín (SAG) con 385 µg/m^3 y Villa de las Flores (VIF) registró el máximo del día con 414 µg/m^3, las cuales están localizadas al norte de la ZMCM.

A partir de las 22:00 h del día 24 de diciembre, se observó un incremento en la concentración horaria de 204 µg/m^3 en la estación Villa de las Flores (VIF) y a partir de la media noche del 25 de diciembre, en dicha estación comenzó un incremento en los niveles de concentración

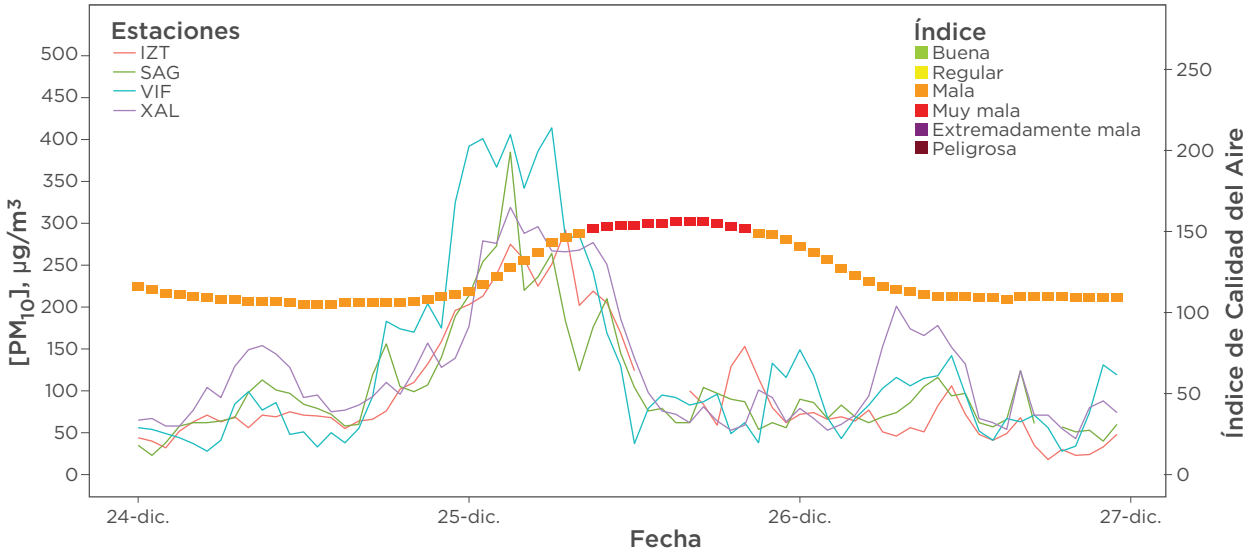


Figura IV.8. Promedio horario de la concentración de PM_{10} del 24 al 26 de diciembre de 2018. Las líneas delgadas corresponden a la concentración observada en las cuatro estaciones de monitoreo que registraron los máximos, la línea con los cuadrados de colores, representan el valor y categoría del índice de calidad del aire.

de PM_{10} con 325 µg/m^3, ocasionados por la quema de fuegos pirotécnicos, la concentración aumentó hasta que se registró el valor máximo a las 07:00 h del 25 de diciembre con 414 µg/m^3.

En las siguientes horas, la concentración horaria descendió notablemente, sin embargo, los valores altos de concentración durante la madrugada tuvieron un impacto en el reporte del Índice de Calidad del Aire, el cual, se calcula con base en el promedio móvil de 24 h, por lo tanto, el valor máximo del Índice se registró a las 11:00 h del 25 de diciembre en la estación VIF con 152 puntos que equivalen a 218 µg/m^3. La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) declaró la Fase I Regional por PM_{10} en la zona noreste al rebasar el valor que activa el PCAA para PM_{10} (215 µg/m^3), dicha zona está conformada por la demarcación territorial de Gustavo A. Madero y los municipios de: Coacalco de Berriozábal, Chicoloapan, Chimalhuacán, Ecatepec de Morelos, Ixtapaluca, La Paz, Nezahualcóyotl y Tecámac.

El valor del Índice se mantuvo por arriba de los 150 puntos durante la mayor parte del día; a las 23:00 h, el índice máximo registrado estaba por debajo de los 150 puntos, sin embargo, la contingencia permaneció hasta el día siguiente. El 26 de diciembre, se suspendió la Fase I Regional por PM_{10} a las 10:00 h, ya que se presentó un valor máximo de 113 puntos del Índice, correspondiente a 110 µg/m^3 del promedio móvil de 24 h y se registraron condiciones favorables para la dispersión de las partículas.

5

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

Composición, pH y lluvia ácida

Los contaminantes gaseosos y las partículas suspendidas pueden depositarse en el suelo, cuerpos de agua y áreas verdes a través de los procesos naturales de depósito seco y húmedo. El depósito seco es la caída libre de las partículas desde la atmósfera, por efecto de la gravedad. El depósito húmedo es el proceso mediante el cual los gases y partículas suspendidas se mezclan con el agua en la atmósfera y son arrastrados por la lluvia, nieve o niebla.

La lluvia ácida es el ejemplo más común de depósito húmedo que se presenta en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y tiene como consecuencia un daño en el suelo de conservación que incluye bosques, cultivos y fauna, además tiene un impacto negativo en los materiales de construcción de edificios y monumentos históricos, también genera corrosión en las estructuras de acero.

Dicho fenómeno está directamente relacionado con las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO_2), o compuestos clorados, provenientes de fuentes naturales y antropogénicas, los cuales forman ácidos fuertes cuando se mezclan con el agua de lluvia como puede ser el ácido nítrico, sulfúrico y en menor proporción, el ácido clorhídrico (Turco, 2002).

El origen de estos gases y partículas con componentes nitrogenados, de azufre y cloro, depende de las actividades que predominan en la región metropolitana. En la Ciudad de México, el dióxido de azufre se origina de fuentes externas como la termoeléctrica y refinería ubicadas en el estado de Hidalgo al noroeste de la zona metropolitana, así como la influencia del volcán Popocatépetl al sureste de la ZMCM (De Foy et al, 2009). Los NOx provienen en su mayoría de fuentes móviles y fijas, sin embargo, también existen emisiones naturales que se forman de los relámpagos y la erosión eólica que arrastra partículas con alto contenido de óxido de nitrógeno, por la nitrificación de la materia orgánica en los suelos. Actualmente, se estima que la CDMX tiene una superficie de más de 65 mil hectáreas susceptibles de erosión. Las fuentes de los compuestos clorados también son biogénicas y antropogénicas, sin embargo, se estima que las fuentes de área son las que tienen mayor emisión de estos compuestos con 11,720 toneladas por año, lo que contribuye al ciclo del cloro en la atmósfera de la Ciudad de México (SEDEMA, 2018b).

Los mayores impactos de la lluvia ácida pueden presentarse lejos de las fuentes iniciales de los contaminantes debido a que, comúnmente, los efectos se observan en la dirección del viento dominante y el transporte de los contaminantes provenientes de las centrales eléctricas, industrias, refinerías y zonas de elevado tránsito vehicular, llegan hasta las zonas ubicadas viento abajo, las cuales no tienen fuentes de emisión importantes, ya que, por lo general, son áreas agrícolas y boscosas de la ciudad. En la ZMCM, los vientos dominantes durante la mayor parte del año son de norte a sur, en consecuencia, las emisiones y contaminantes se transportan hacia el sur y suroeste, donde reaccionan con la lluvia para formar ácidos que afectan los bosques en la Sierra Ajusco Chichinautzin y el suelo de conservación, donde se realiza la recarga de los acuíferos.

El muestreo y la caracterización de la composición del depósito atmosférico en la ZMCM, se realiza con el objetivo principal de estudiar los cambios en su composición y acidez, esto se hace a través de las campañas de muestreo en

la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) que se lleva a cabo desde 1988.

La campaña 2018 de la REDDA comenzó con la recolección de las primeras muestras durante la última semana de abril y terminó en la penúltima semana de noviembre, los meses analizados son de mayo a octubre, periodo que representa la temporada de lluvia, con un total 26 lotes de muestreo recolectados semanalmente, analizados, validados y reportados. Cabe mencionar, que, durante enero a marzo se presentaron lluvias aisladas y de poca intensidad en la Ciudad de México, las cuales se consideran extemporales y por lo tanto, no están dentro del calendario de recolección de muestras.

La suficiencia de información para la mayoría de las estaciones de REDDA fue de 85 a 96%, excepto en Milpa Alta (MPA) y Diconsa (DIC), con 73 y 69 % de suficiencia respectivamente, dichas estaciones presentaron mayor número de días sin muestra recolectada, o bien, casos donde la muestra fue de dos semanas, por tanto los datos de concentración se reportaron para la semana en la que se recolectó la muestra debido a que no se cuenta con un método de ponderación para estos casos.

En general, las zonas con menor precipitación acumulada son noreste y sureste. Los datos por estación indican que el sitio con menor precipitación fue CORENA (COR), al sureste, con 524 mm, por el contrario, la estación con el valor máximo registrado fue Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), al suroeste, con 1,320 mm. Esta distribución espacial de la lluvia es similar a los años anteriores, aunque el promedio de la precipitación fue mayor en 2018, con un valor de 922 mm, mientras que en 2017 se registró 815 mm, lo cual representa un aumento de 107 mm en el promedio anual, esto debido a que, en abril del 2018, se observó un aumento considerable en la precipitación (**Figura V.1**).

La distribución espacial de la precipitación en 2018 indica que la mayor acumulación de lluvia se presentó en el suroeste de la Ciudad de México, tendencia que ha sido constante a través de los años. En la zona montañosa, se presenta mayor precipitación debido a que ocurre un efecto orográfico importante, la temperatura y altitud de las montañas propicia la formación de nubosidad y la condensación del vapor de agua, lo que conlleva a precipitaciones más frecuentes e intensas. En la zona suroeste se presenta acumulación de lluvia, con valores dentro del rango de 1,270 a 1,368 mm, mientras que las zonas con menos acumulación se encuentran al noreste y este de la Ciudad de México con valores de 486 a 584 mm (**Figura V.2**).

pH

Uno de los objetivos principales de la REDDA es identificar aquellas zonas de la ciudad que son afectadas por la lluvia ácida, el cual es un problema grave que tiene un impacto en el suelo de conservación a corto, mediano y largo plazo ya que altera el ciclo de nutrientes y aumenta los niveles de concentración de nitrógeno y azufre, este último tiene más efecto sobre los ecosistemas forestales, pues origina la pérdida de nutrientes básicos necesarios para el crecimiento de las plantas e inhibe la absorción de estos, altera el funcionamiento de enzimas y se presenta un debilitamiento progresivo de la planta. En zonas urbanas, la lluvia ácida puede tener efecto corrosivo sobre los materiales.

Para caracterizar la acidez del agua se utiliza la escala de pH, en la cual una solución con pH 7

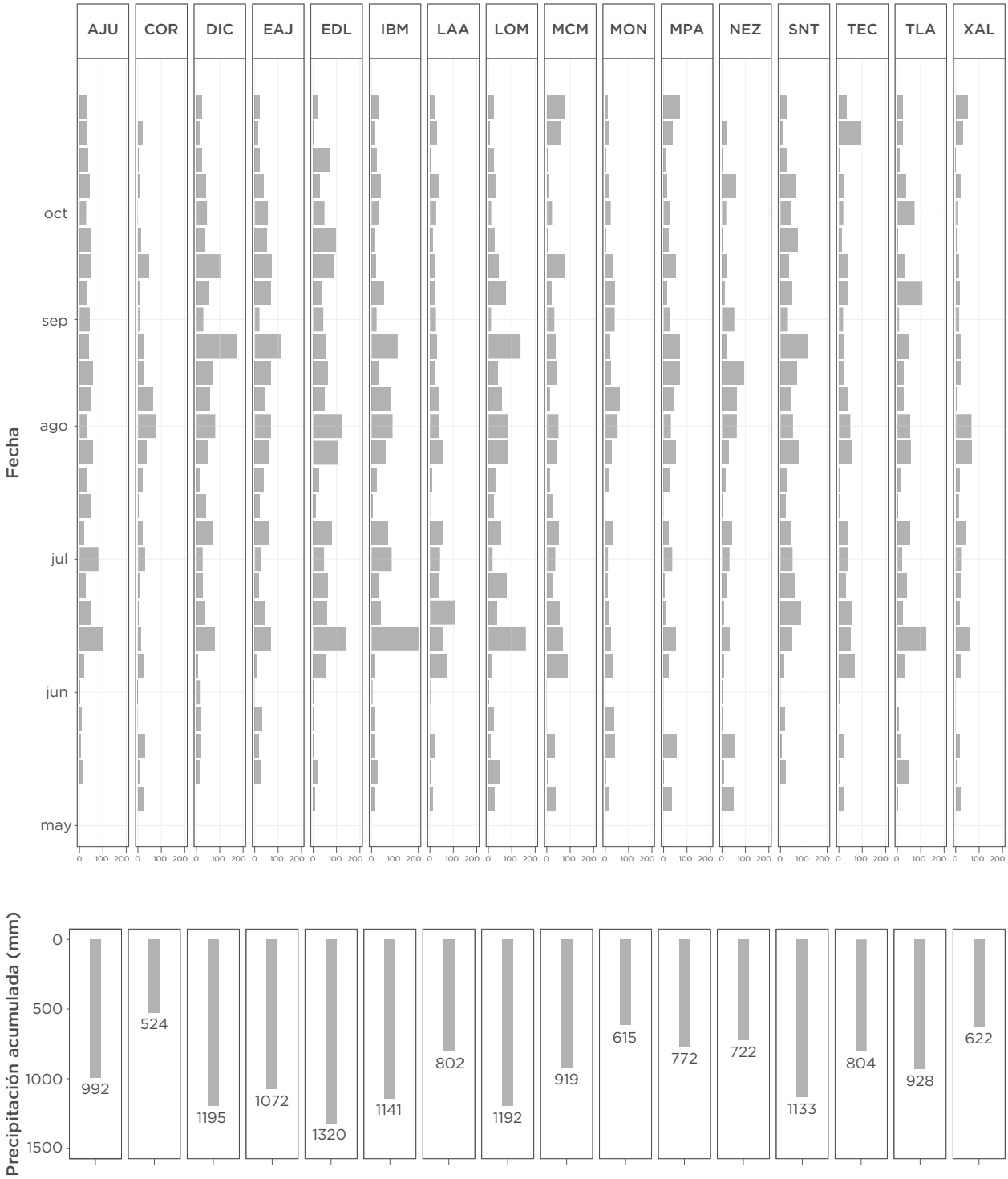


Figura V.1. Precipitación acumulada (mm), en cada uno de los sitios de muestreo de la REDDA durante la temporada de lluvia 2018. El gráfico superior indica el volumen de cada muestreo semanal, mientras que el inferior, el volumen acumulado por estación, durante toda la temporada.

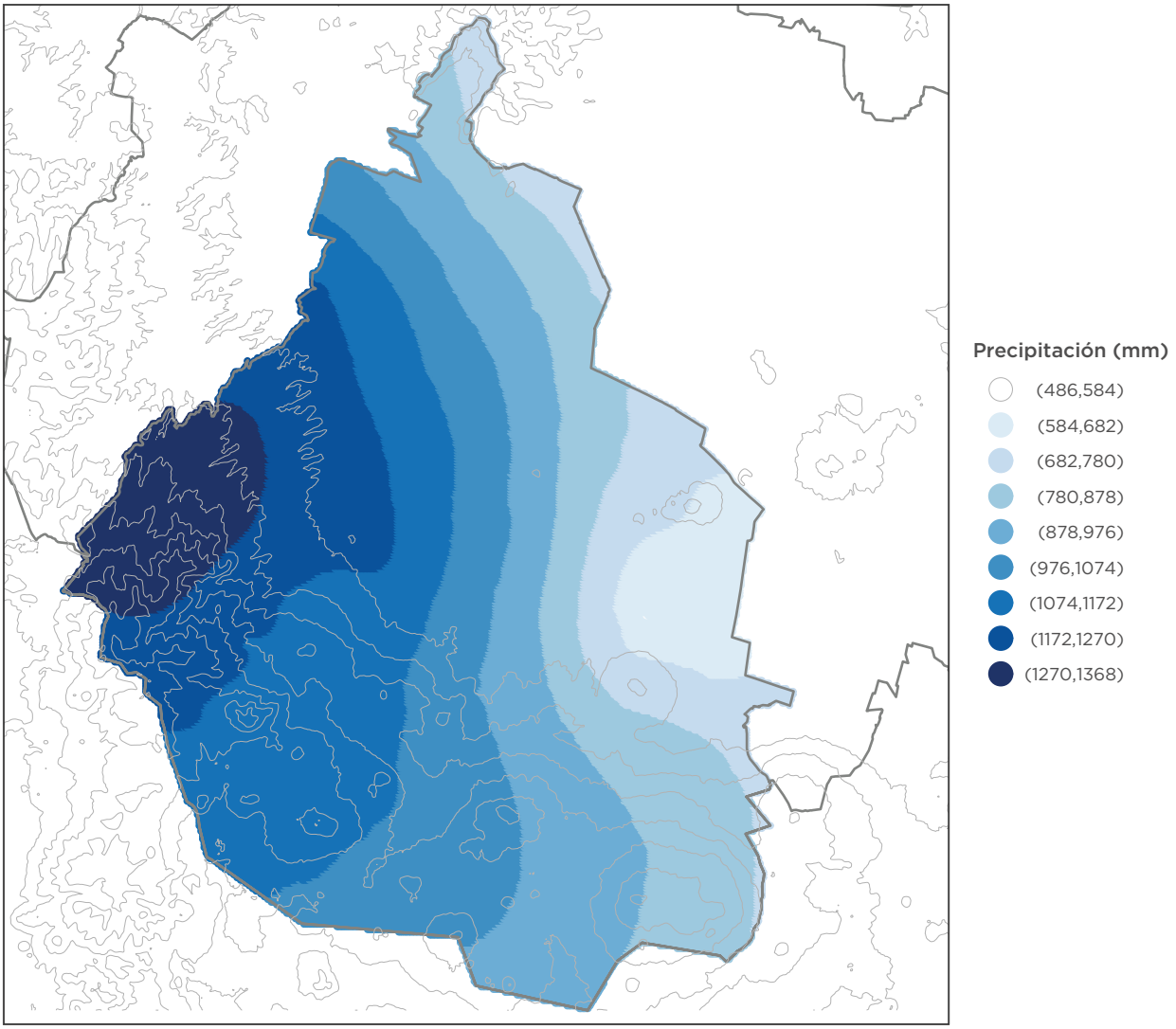


Figura V.2. Distribución espacial de la precipitación durante la temporada de lluvia 2018 en la Ciudad de México.

se considera neutra. Cuando el valor es superior a 7 se considera que una sustancia sea básica, por el contrario, pH inferior a 7 representan ácidos; la escala pH es una escala logarítmica, por lo que cada entero es equivalente a un factor de 10. Es decir, un pH 6 es diez veces más ácido que un pH neutro, mientras que un pH 5 es cien veces más ácido y así sucesivamente. Normalmente, el agua de lluvia es ligeramente ácida, con un pH de 5.6, debido a la presencia natural de dióxido de carbono (CO_2), el cual forma ácido carbónico, además de otras fuentes naturales de óxidos de nitrógeno y azufre. Estas fuentes contribuyen a la acidez natural de la lluvia en áreas que están alejadas de emisiones antropogénicas y este nivel de acidez es crucial para impulsar los ciclos geoquímicos globales a largo plazo. Sin embargo, la lluvia se considera ácida cuando su pH se encuentra por debajo de 5 y estos valores son asociados directamente a las

emisiones antropogénicas de óxidos de azufre y nitrógeno, los cuales son precursores de ácidos fuertes como el sulfúrico y nítrico, respectivamente. Los valores de pH 5 pueden llegar a ser tolerables a largo plazo, sin embargo, valores cercanos a 3 o menores, son dañinos para la vegetación, flora y fauna, suelos y cuerpos de agua que están expuestos.

Con la finalidad de identificar las regiones impactadas por la lluvia ácida en la ZMCM, se considera el valor de pH 5.6 como referencia para caracterizar los datos obtenidos de la REDDA, por lo que todas aquellas muestras que presenten pH superiores a 5.6 son consideradas básicas y las que se encuentran por debajo de ese valor, son ácidas.

Al comparar los datos de pH obtenidos por estación durante los años 2016 al 2018 y clasificarlas en ácidas o básicas, se puede observar en la **Figura V.3a** que, prácticamente, todas las estaciones indican el mismo patrón en cuanto al número de muestras básicas y ácidas, por lo que no hay una diferencia significativa entre los tres años con excepción de la estación de San Nicolas Totolapan (SNT) que en 2016 presentó más del 50% de muestras ácidas. Comparado con 2017 y 2018, el 2016 fue un año complicado por contaminación debido al fenómeno global del Niño, el cual, fue uno de los más fuertes de la historia y provocó que se presentaran condiciones meteorológicas que favorecieron la presencia de días con niveles altos de contaminación. En cuanto al comportamiento mensual, es normal que a inicios de la temporada de lluvias se realiza el lavado atmosférico, de acuerdo a los registros del Servicio Meteorológico Nacional correspondiente a la lluvia acumulada mensual para la Ciudad de México, el año con el valor mínimo fue en 2017, similar al 2016 que tampoco tuvo una gran presencia de lluvia, con la mayor cantidad de precipitación acumulada en los meses de julio, agosto y, en menor parte, junio y septiembre. Finalmente, el año 2018 presentó el máximo de lluvia acumulada en agosto, seguido de junio y septiembre, esto ocasionó que se incrementara el número de muestras de lluvia ácida (**Figura V.3b**).

Durante la campaña 2018, las muestras más ácidas se reportaron en Milpa Alta (MPA) y Nezahualcóyotl (NEZ) con pH de 3.86 y 4.09, respectivamente. Las muestras con pH más alto, es decir las más básicas, se registraron en las estaciones Museo de la Ciudad de México (MCM) y Tlalnepantla (TLA) con valores de 7.62 y 7.49, respectivamente.

Las estaciones con mayor número de muestras ácidas fueron Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT), Ajusco (AJU) y Milpa Alta (MPA), ubicadas en la zona sur de la ciudad, donde está el suelo de conservación (**Figura V.4**). El patrón de la distribución espacial del pH ha sido constante ya que, en años anteriores, las estaciones de la zona sur comúnmente presentan un mayor número de muestras ácidas, sin embargo, en 2018 se observó que la estación DIC, al suroeste, registró una disminución importante en el número de muestras ácidas. También se observa que las estaciones de la zona norte como Tlalnepantla (TLA), Lomas (LOM) y en el centro, la estación Museo de la Ciudad de México (MCM), disminuyeron su acidez con respecto a otros años.

Es importante resaltar que se debe considerar el número total de muestras validadas por año, ya que como se mencionó anteriormente, la campaña 2018 tiene mayor número de muestras y en el acumulado de muestras ácidas, aparentemente aumentaron en comparación a 2017, no obstante, si se considera el número de muestras totales y su proporción, en 2016 las muestras ácidas representan el 29.4%; en 2017 son el

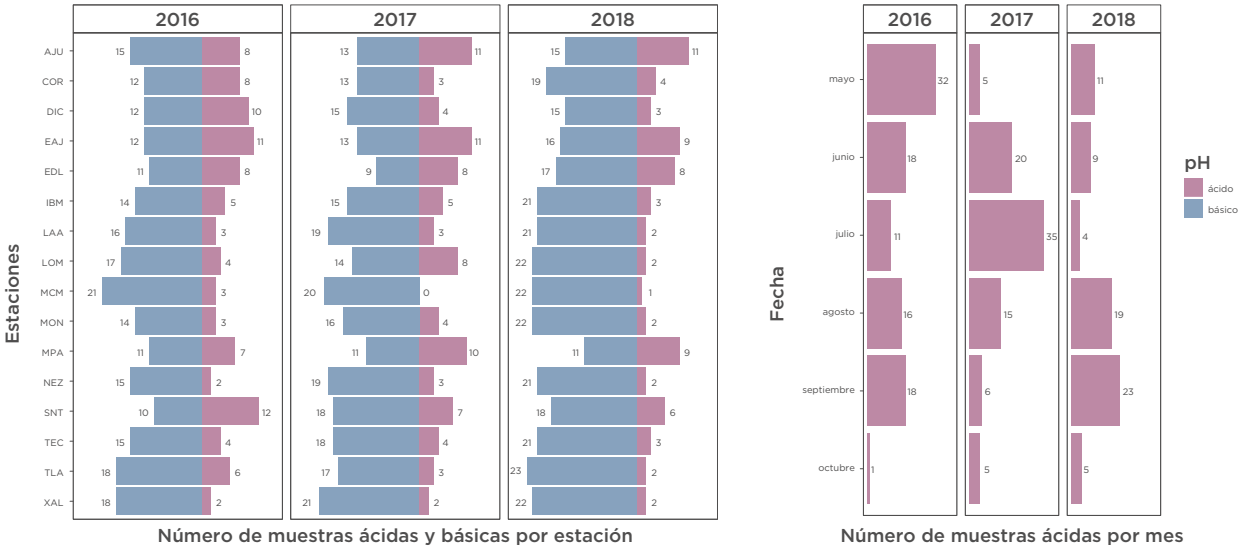


Figura V.3. a) Comparación de las muestras totales ácidas y básicas, de las campañas 2016, 2017 y 2018 por estación (izquierda). **b)** Comparación de las muestras totales ácidas acumuladas por mes, de las campañas 2016, 2017 y 2018 (derecha).

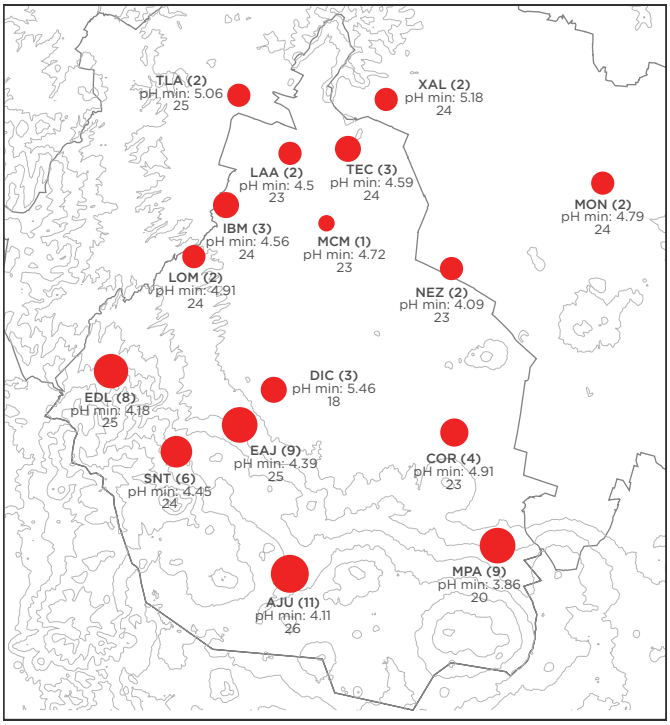


Figura V.4. Distribución espacial de muestras con pH ácido (<5.6) durante la temporada de lluvia 2018 en la Ciudad de México. El tamaño del círculo es proporcional al número de muestras consideradas como lluvia ácida. El nombre del sitio de monitoreo se expresa en clave de la estación, entre paréntesis se encuentra el número de muestras ácidas que se presentaron, ya que el total de muestras recolectadas se encuentra debajo del pH mínimo reportado.

25.4%, finalmente en 2018 representan el 21.1% del total de las muestras, lo que indica una disminución de la cantidad de muestras ácidas en estos tres años.

Con los resultados anteriores se tiene un panorama general donde se observa que las muestras con pH básico se registran con mayor frecuencia, sin embargo, esto no significa que el problema de alteración de los ecosistemas causado por la lluvia ácida esté erradicado, ya que todas las estaciones presentan, al menos, 2 muestras ácidas durante la campaña y aunque no se ha profundizado en los análisis al respecto, la basicidad del agua de lluvia, también puede representar un problema a largo plazo debido a que en algunos estudios se ha encontrado que una alta alcalinidad en el suelo, con exceso de sales como Na_2SO_4, K_2SO_4, NaCl y KCl, afecta negativamente el crecimiento de las plantas, lo que reduce el rendimiento del cultivo y puede conllevar a un suelo estéril (Day et al, 1993).

Composición iónica

Las especies iónicas más abundantes en las muestra de lluvia de la ZMCM, de acuerdo con los promedios calculados en microequivalente por litro (µeq/L), fueron amonio (NH_4^+), sulfato (SO_4^{2-}), calcio (Ca^{2+}) y nitrato (NO_3^-), los cuales aportan el 34.7%, 22.6%, 18.1% y 16.3% respectivamente, en la concentración total (**Figura V.5**). En menor proporción se encontraron iones como el cloro (Cl^-), sodio (Na^+) , hidrógeno (H+), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) los cuales representan el 8% de la concentración total.

En orden descendente, la abundancia relativa de los iones es $NH_4^+ > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > NO_3^- > Cl^- > Na^+$

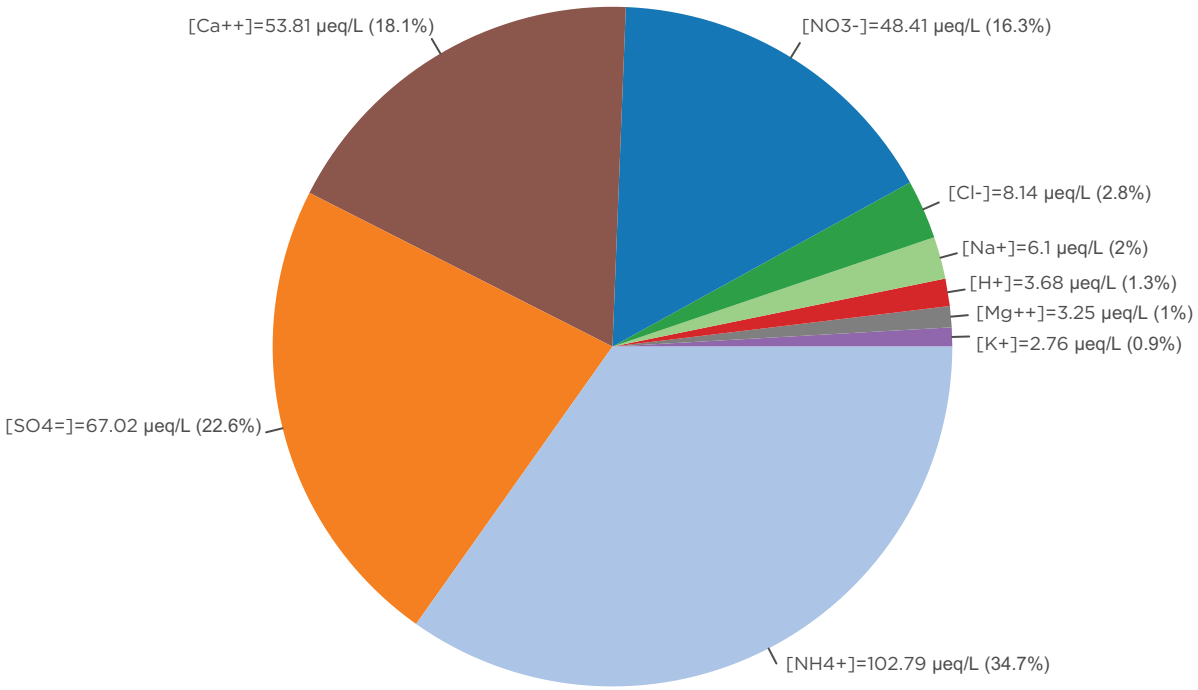


Figura V.5. Contribución promedio y porcentual de cada una de las especies iónicas analizadas en las muestras de depósito húmedo 2018.

> H^+ > Mg^{2+} > K^+. Las especies de calcio y amonio son los cationes más abundantes pues juntos representan el 52.8%, y son los responsables del aumento de muestras con pH mayor a 5.6, como se explica en el apartado de pH, debido a que forman sales que aumentan la basicidad de una solución.

Es importante mencionar que los iones amonio representan la parte disuelta del amoniaco (NH_3), este compuesto forma una base débil que reacciona con donantes de protones y en la atmósfera esta especie neutraliza a los ácidos sulfúricos y nítricos producidos por los óxidos correspondientes a estos compuestos (SO_2 y NOx). La fuente principal del amoniaco es la producción alimentaria debido a que la adición de nitrógeno a los fertilizantes que se utilizan en este proceso provoca la pérdida de esta especie en los suelos, sin embargo, en grandes ciudades, la basura, las actividades humanas, las heces de animales, las potabilizadoras de agua y los vehículos son las principales fuentes de amoniaco (FAO, 2004; SEDEMA, 2017).

La fuente más importante de calcio, es por procesos naturales como la erosión del suelo y polvos provenientes de la corteza terrestre; los tres tipos de suelo predominantes en México son Leptosoles, Regosoles y Calcisoles, estos son considerados como poco desarrollados, lo cual dificulta su aprovechamiento agrícola y aumenta su vulnerabilidad a la erosión; en el centro del país predominan los Vertisoles, un tipo de suelo con alto contenido de arcillas (SEMARNAT, 2013).

En la distribución espacial de la concentración por cada especie iónica (**Figura V.6**), se puede observar que en todas las estaciones de REDDA el ion amonio tiene mayor concentración, seguido de los sulfatos. En estaciones del suroeste y sureste, se presenta mayor concentración de la especie hidronio, lo cual es congruente con la cantidad de muestras ácidas que se detectaron en la campaña de 2018.

En la **Tabla V.1** se presenta la correlación de Spearman (poblaciones con distribución no normal) entre los compuestos analizados durante la campaña 2018, se observa que el calcio tiene correlación con el magnesio, lo cual puede indicar que este último, tiene un origen similar al calcio y se encuentra presente en algún tipo de suelo común en México que contenga material calcáreo o caliza, dicho material es un tipo de roca compuesta en su mayoría por carbonato de calcio, principalmente calcita ($CaCO_3$) y que puede presentar trazas de magnesita ($MgCO_3$), además de otros carbonatos.

El cloro presenta una correlación media con el sodio, esto podría indicar una relación directa, por lo tanto, se podría deducir su origen como sal marina, sin embargo, la proporción en la que se presenta el cloro es mayor, por lo que el origen de estas dos especies puede tener contribución local y/o antropogénica debido a que también puede ser emitido a la atmósfera por los incendios forestales, la quema de basura y las emisiones volcánicas. De igual forma, presenta una relación media con el amonio, lo que podría explicarse con la posible formación de aerosoles de tipo NH_4Cl (Vázquez Morera et al. 2012); el amonio presentó alta correlación con nitrato y sulfato, lo que indica que este ion neutraliza los ácidos sulfúrico y nítrico.

El coeficiente de correlación del NO_3^- con NH_4^+ es más alto debido a que el compuesto nitrato de amonio (NH_4NO_3) es un producto de la reacción de neutralización antes mencionada entre las dos especies iónicas. En ocasiones, un hidrógeno en la molécula del amoniaco puede ser reemplazado por el sodio y el potasio, lo que forma especies químicas denominadas amidas, esta puede ser la razón de la correlación entre el amoniaco y estas dos especies (K^+ y Na^+).

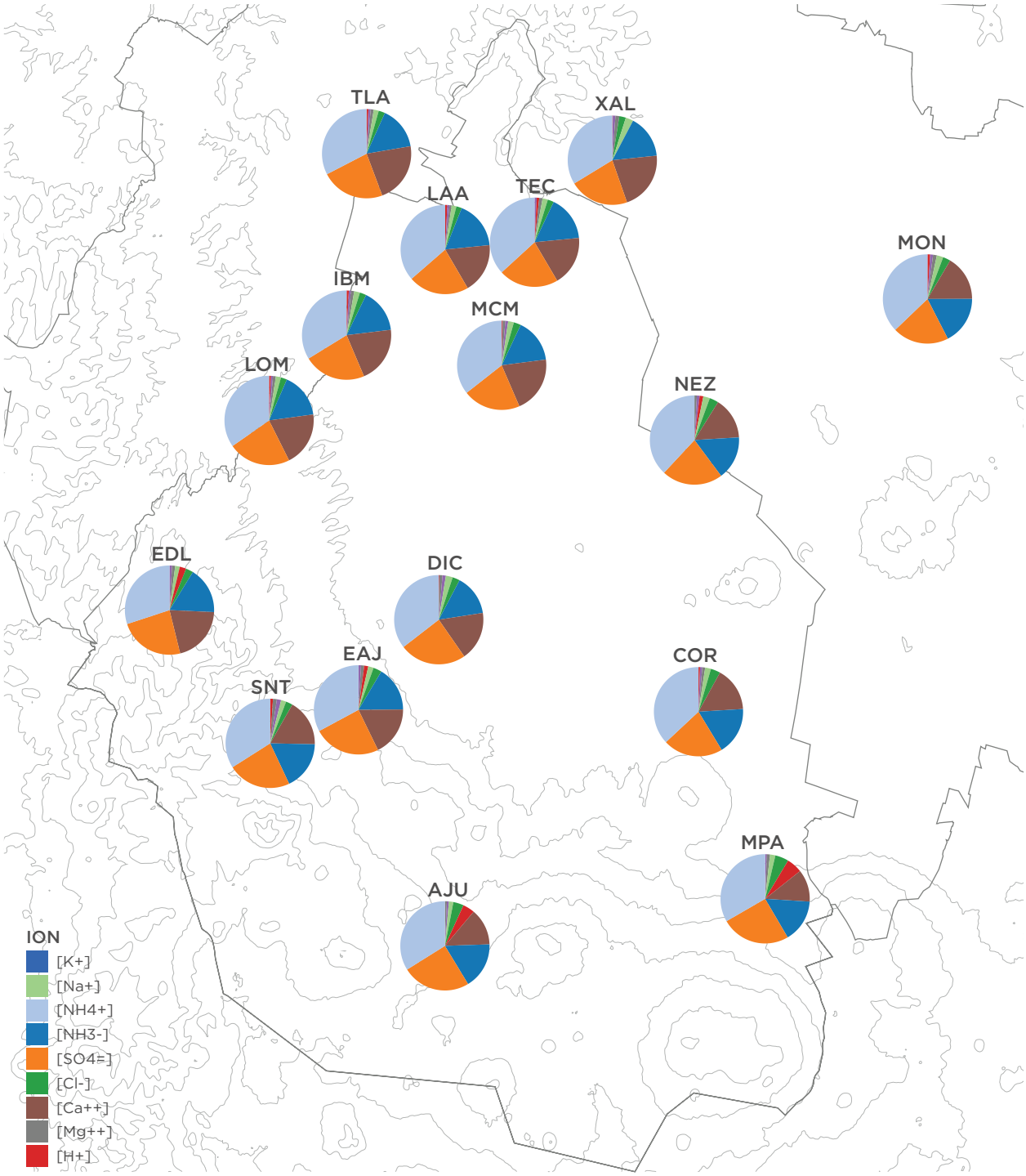


Figura V.6. Distribución espacial del depósito atmosférico por especie iónica. El tamaño de cada porción en los gráficos corresponde al valor de la concentración de cada ion por estación.

Tabla V.1. Correlación entre los compuestos medidos durante la campaña 2018.

	$[K^+]$	$[Na^+]$	$[NH_4^+]$	$[NO_3^-]$	$[SO_4^{2-}]$	$[Cl^-]$	$[Ca^{2+}]$	$[Mg^{2+}]$
$[K^+]$	1.00	0.72	0.51	0.47	0.35	0.39	0.64	0.48
$[Na^+]$	0.72	1.00	0.54	0.54	0.40	0.61	0.64	0.39
$[NH_4^+]$	0.51	0.54	1.00	0.83	0.68	0.52	0.68	0.39
$[NO_3^-]$	0.47	0.54	0.83	1.00	0.65	0.58	0.64	0.36
$[SO_4^{2-}]$	0.35	0.40	0.68	0.65	1.00	0.55	0.47	0.30
$[Cl^-]$	0.39	0.61	0.52	0.58	0.55	1.00	0.44	0.25
$[Ca^{2+}]$	0.64	0.64	0.68	0.64	0.47	0.44	1.00	0.57
$[Mg^{2+}]$	0.48	0.39	0.39	0.36	0.30	0.25	0.57	1.00

Se desagregó la concentración por zona, agrupando las estaciones de acuerdo con su ubicación en: noroeste, noreste, centro, suroeste y sureste, en las que se puede apreciar en forma detallada, la contribución de las especies iónicas y caracterizar cada zona por semana de muestreo, en la **Figura V.7**, se puede observar que, en el noroeste, el amonio y sulfato predominan durante toda la campaña, pero, a mediados y finales de la campaña se observa el aumento en calcio y nitratos. En el noreste ocurre un patrón similar con el amonio y sulfato como la especie dominante, sin embargo, el calcio y el nitrato se presentan en menor proporción que en la zona noroeste, adicionalmente se observa un aumento en el cloruro e hidronio a partir de la mitad de la campaña. La zona centro se caracterizó con altas concentraciones de amonio, sulfatos, calcio y nitrato, además se observa una mayor contribución de especies iónicas como el cloro, potasio, sodio y magnesio. En las zonas suroeste y sureste, su principal característica es el notable aumento en iones hidronio y cloruro, especialmente en la zona sureste. Los iones predominantes en ambas zonas también son amonio y sulfatos, sin embargo, en el sureste se presentan en mayor proporción, esto debido a la dispersión de los contaminantes causada por la dirección del viento.

Depósito atmosférico húmedo

En términos generales, la suma de los iones amonio, nitrato y sulfato, contribuyó en promedio con el 84.2% del depósito total, con aportaciones individuales de 19.6, 31.7 y 32.9%, respectivamente. La contribución del resto de iones fue de 15.6% y donde el 10.1% corresponde al ion calcio. En comparación con el año pasado, 2018 obtuvo una tendencia similar en las especies iónicas, sin embargo, se observa un aumento importante en aniones SO_4^{2-}, NO_3^- y en el catión Ca^{2+}.

En la Ciudad de México y su zona metropolitana, se ha observado que en todas las campañas de REDDA, el sulfato es la especie predominante en el depósito atmosférico, sin embargo, las fuentes de SO_2 dentro de la ciudad se han reducido considerablemente a través de los años, lo que puede indicar que existe una importante contribución de fuentes externas, como puede ser la

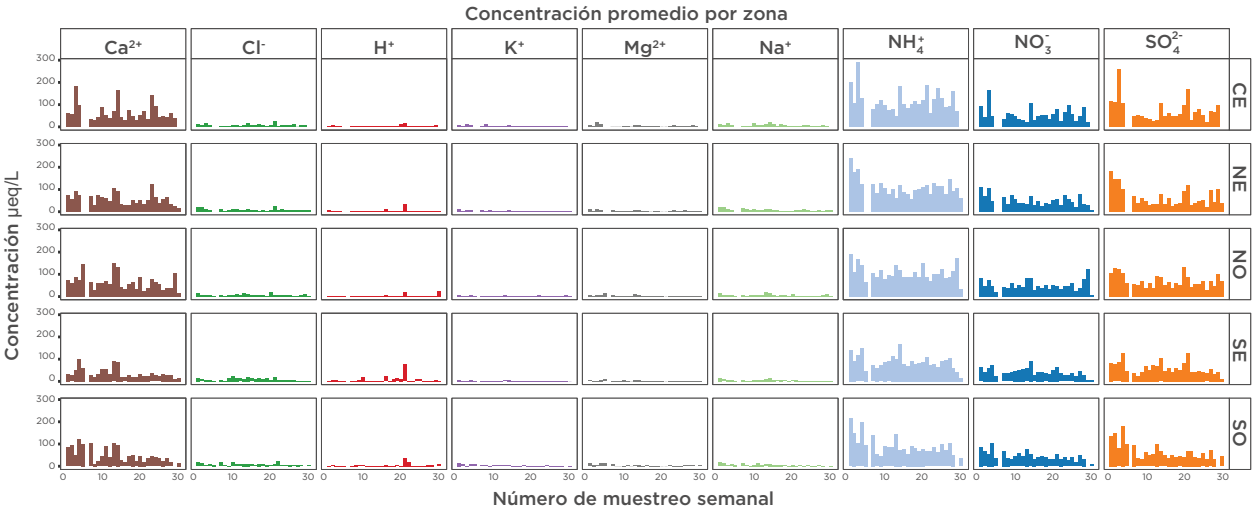


Figura V.7. Concentración de cada especie iónica por zonas. CE - centro, NE - noreste, NO - noroeste, SE - sureste y SO - suroeste.

zona de Tula y el volcán Popocatépetl. El sulfato, junto con el nitrato, contribuye a la acidez del agua de lluvia y son las especies con mayor aportación en el depósito.

En el análisis del depósito total por especie iónica y sitio de muestreo de REDDA (**Tabla V.2**), se puede observar que las estaciones de Legaria (IBM), Diconsa (DIC) y Lomas (LOM) registraron la mayor cantidad de depósito (expresado como la suma de los iones reportados) con 103.70, 101.81 y 101.67 kg/ha, respectivamente; mientras que Montecillo (MON) registró el valor mínimo con 52.68 kg/ha. Anteriormente se mencionó que los iones de calcio, amonio, nitrato y sulfato tienen mayor contribución en el depósito, y en el análisis por estación, IBM presentó los valores más altos de calcio y amonio con 11.38 y 20.69 kg/ha, respectivamente. En el caso del nitrato, el máximo se registró en LOM con 32.27 kg/ha, mientras que, en sulfato, la estación con mayor depósito de este ion fue IBM con 34.13 kg/ha.

Se puede observar que en estaciones del suroeste como AJU, EAJ y EDL predominan las especies de iones hidronio, cloruros y nitratos, lo que está relacionado con la acidez debido a la formación de ácido clorhídrico y nítrico, lo cual es congruente con la cantidad de muestras ácidas registradas en dichas estaciones y que fue mayor en la zona suroeste.

Las especies iónicas de sodio, calcio, amonio y sulfatos predominan en el noroeste, sin embargo, también se presentan en el noreste y centro de la ZMCM, la contribución de los sulfatos puede estar influenciada por las fuentes externas de dióxido de azufre, mientras que el amonio, como ya se mencionó anteriormente, es por la actividad humana, uso de fertilizantes y la ganadería en las zonas agrícolas que rodean la ZMCM, la generación de basura y emisión de los vehículos.

En el caso de la cantidad de depósito total para magnesio, calcio y sodio, son compuestos que normalmente se asocian con el tipo de suelo, mientras que el potasio está relacionado con la quema de biomasa como la leña e incendios forestales.

Tabla V.2. Depósito total para las diferentes especies analizadas, por estación (kg/ha).

	H+	Na+	K+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^{-}	$NH4^{+}$	$NO3^{-}$	$SO4^{2-}$	Total estación
AJU	0.09	0.79	0.56	0.28	5.01	3.12	12.27	21.34	22.81	66.27
COR	0.01	0.81	0.54	0.23	4.84	2.13	11.61	17.86	17.46	55.49
DIC	0.01	1.68	1.27	0.46	11.09	2.77	20.15	31.51	32.87	101.81
EAJ	0.06	1.13	0.88	0.44	8.63	3.06	15.24	27.27	29.42	86.13
EDL	0.08	1.11	0.93	0.52	9.49	3.11	15.64	30.71	27.70	89.29
IBM	0.03	1.47	1.10	0.49	11.38	2.43	20.69	31.98	34.13	103.70
LAA	0.02	0.89	0.67	0.36	8.05	1.67	16.08	24.95	23.03	75.72
LOM	0.02	1.27	0.77	0.41	11.40	2.39	19.68	32.27	33.46	101.67
MCM	0.01	1.25	1.49	0.48	10.24	2.16	18.86	29.75	29.13	93.37
MON	0.02	0.92	0.66	0.36	4.82	1.50	10.97	16.54	16.89	52.68
MPA	0.09	0.77	0.41	0.28	4.07	3.01	10.98	17.64	21.82	59.07
NEZ	0.02	1.00	0.69	0.25	5.65	2.15	14.14	19.65	21.75	65.30
SNT	0.04	1.17	1.38	0.50	8.14	2.48	16.40	29.04	27.79	86.94
TEC	0.02	0.98	0.66	0.30	7.39	1.91	14.82	22.54	22.38	71.00
TLA	0.02	0.92	0.76	0.33	10.12	1.79	16.81	26.21	32.06	89.02
XAL	0.00	1.29	0.73	0.40	8.33	1.71	12.90	20.37	20.16	65.89
Total ion	0.54	17.45	13.5	6.09	128.65	37.39	247.24	399.63	412.86	1263.35

6

ESPECIACIÓN QUÍMICA HORARIA DE AEROSOLES ORGÁNICOS ATMOSFÉRICOS

Caso de estudio: Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en $PM_{2.5}$. Resultados de la campaña EQAA1, 2018

Elaborado por: Amador-Muñoz Omar, Martínez-Domínguez Y. Margarita, Reyes-Gutiérrez Jessica A., Franco-Hernández Alejandro I.*Grupo de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos, CCA-UNAM.*

Un aerosol atmosférico es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas (Baron y Willeke, 2001). Las partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros, PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente, pertenecen a la fase particulada del aerosol. La importancia de su estudio se debe a sus efectos de calentamiento o enfriamiento del clima global (IPCC, 2013) y en la salud humana (Cassee et al. 2013, Miller 2020), que dependen de su concentración, diámetro y composición química.

La masa de las partículas es la única variable regulada por la normatividad actual (NOM-025-SSA1-2014). Sin embargo, aunque se superen los límites máximos permitidos, su composición determina la toxicidad. Por lo tanto, es fundamental profundizar en el conocimiento sobre su composición, para comprender mejor los mecanismos que incrementan el riesgo de la morbilidad y mortalidad humana. La composición de las partículas provee información sobre el tipo de fuentes de emisión y los procesos de transformación química que conllevan a la generación de nuevas especies que integran el material particulado.

Las partículas se forman por miles de especies orgánicas (Goldstein y Galbally, 2007) y, en menor proporción, de especies inorgánicas, lo cual hace extremadamente complejo su estudio. La fracción orgánica de las partículas contiene cientos de especies con distintas propiedades fisicoquímicas (presión de vapor, polaridad, fotoestabilidad, etc.) y representa del 25% al 30% de la masa de las $PM_{2.5}$ (Philip et al. 2014; Cheng et al. 2016). En el Valle de México, se estima que también contribuyen con menos del 50% de la masa de $PM_{2.5}$ (Amador-Muñoz et al. 2011; SEDEMA, 2018a).

En general, la especiación química de las partículas a nivel molecular se puede determinar por métodos “off-line” y “on-line”. Los métodos “off-line” se desarrollan generalmente en tres etapas: colecta de partículas, tratamiento de muestra y análisis instrumental. Los métodos “on-line”, condensan las tres etapas en una sola. Ambos ofrecen ventajas y desventajas. Los métodos “off-line” ofrecen baja resolución temporal, pero alta especificidad. Es decir, minimizan los errores en la identificación y, por lo tanto, en la cuantificación de las especies químicas, pero el proceso de información es tardado (días a semanas). Por otro lado, los métodos “on-line”, ofrecen alta resolución temporal, pero son inespecíficos. Es decir, la información se obtiene en cortos periodos de tiempo (segundos a horas), pero existe la probabilidad de cometer errores en la identificación de las especies químicas, lo que conlleva a sobre estimar sus valores de concentración, o incluso, a una caracterización incorrecta de la especie.

La Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) adquirió en 2018, un Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos acoplado a un Cromatógrafo de Gases con un detector de Espectrometría de Masas (TAG-GC-MS[2], por sus siglas en inglés), con el objetivo de analizar con gran resolución temporal[3], la especiación de

[2] *Thermal Desorption Aerosol-Gas*
[3] Resolución horaria

los compuestos orgánicos de origen primario y secundario presentes en las partículas suspendidas en la Ciudad de México, en colaboración con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (**Figura VI.1**). EL TAG-GC-MS es un instrumento único en México que emplea un método "on-line" donde se combina la adquisición de datos con alta resolución temporal y alta especificidad, destinado a la búsqueda de marcadores orgánicos primarios asociados con fuentes de emisión específicas de origen natural y antropogénica, a la detección de marcadores orgánicos secundarios relacionados con la química atmosférica en la Ciudad de México, así como al análisis de la distribución horaria diurna y nocturna de dichos marcadores.

Este capítulo presenta la información horaria de la variación diurna y nocturna de una familia de compuestos que integran la fracción orgánica de las $PM_{2.5}$, seleccionados por sus efectos cancerígenos en humanos, los cuales están clasificados en los grupos 1, 2A y 2B por la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC 1983, 2010, 2012). Dichos compuestos son denominados Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) y están conformados por: benzo[a]antraceno (BaA), criseno (Cris), benzo[b] fluoranteno (BbF), benzo[k]fluoranteno (BkF), benzo[j]fluoranteno (BjF), benzo[a]pireno (BaP) e indeno[1,2,3-cd]pireno (I123cdP). Además, se presenta al reteno, HAP considerado marcador de la quema de madera blanda "softwood" relacionada con coníferas (Ramdahl, 1983; Bravo et al. 2006; Villalobos-Pietrini et al. 2006). Los HAP se liberan al ambiente por emisiones primarias producidas especialmente por la quema incompleta de combustibles fósiles y no fósiles, a través de reacciones por pirólisis y pirosíntesis, así como por la evaporación de combustibles que los contienen. Se conforman por dos o más anillos aromáticos de cinco y seis átomos de car-

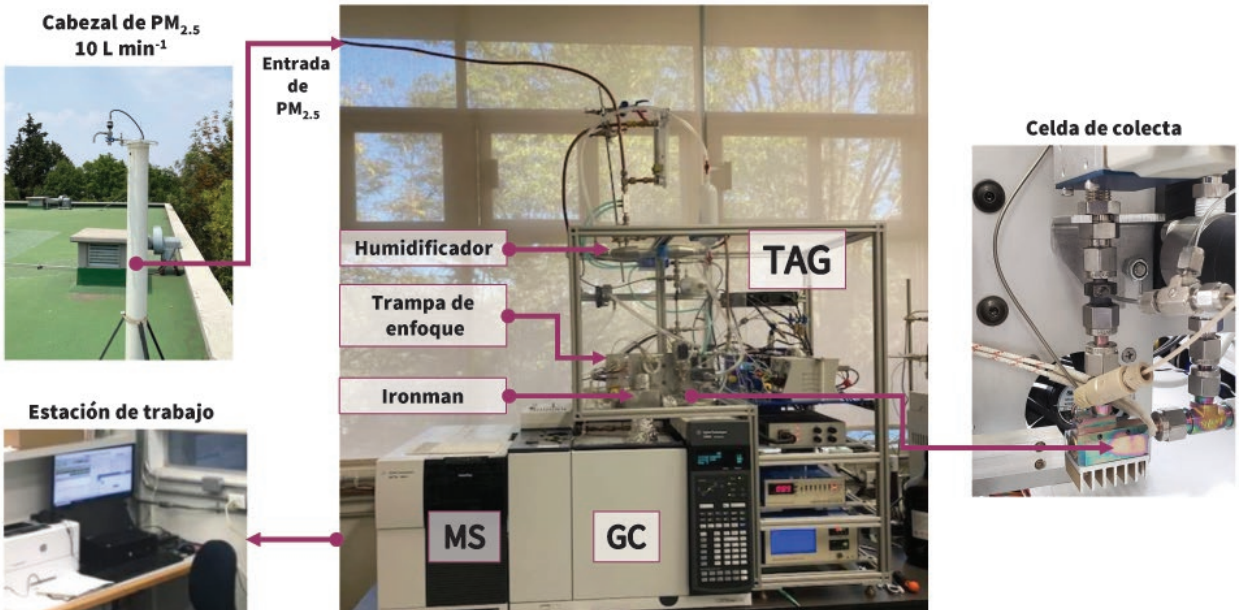


Figura VI.1. Colecta de $PM_{2.5}$ mediante el Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos (TAG) acoplado al Cromatógrafo de Gases (GC) – Espectrómetro de Masas (MS).

bono fusionados. Los HAP se han determinado previamente en la Ciudad de México con métodos "off-line" (Amador-Muñoz et al. 2010, 2011, 2013, 2020; Mugica et al. 2010).

Método

La primera campaña para la Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (EQAA1), se llevó acabo del 5 de noviembre al 15 diciembre del 2018, durante la época seca fría, en la que, usualmente, se presenta la mayor concentración de partículas del año, en la campaña participaron cinco grupos de trabajo del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) y la SEDEMA. En este periodo se realizó el muestreo de $PM_{2.5}$ con el TAG-GC-MS (Aerodyne TAG-005, Agilent Technologies 7890B/5977B).

Las mediciones se realizaron en el campus principal de la UNAM localizado al suroeste de la Ciudad de México (19° 19' 34.11'' N, 99° 10' 33.89'' W), considerado sitio receptor de contaminantes atmosféricos. El muestreo tuvo una duración de 60 min a 10 L/min.

Las partículas introducidas y humidificadas por el TAG, impactan en la celda de colecta (**Figura VI.1**). Los compuestos orgánicos presentes en las partículas, se termodesorben y se transfirieren a 300 °C hacia una trampa de enfoque a 30 °C (~16 min), para nuevamente ser termodesorbidos y transferidos a 300 °C hacia la columna cromatográfica en el GC a 40 °C (~10 min).

La separación se llevó a cabo en una columna capilar DB35 ms de 60 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno, 0.25 µm de grosor de fase. El tiempo para la separación cromatográfica y detección espectrométrica fue 50 min. La ionización fue electrónica a 70 eV. La identificación de los HAP se determinó con los tiempos de retención relativos a seis HAP fluorados como estándares internos, mientras que la cuantificación, se realizó con el método de dilución isotópica con respecto a 16 HAP deuterados, integrados con el software MSD Chemstation F.01.03.2357. El análisis estadístico se llevó a cabo con el paquete Statistica 13 (TIBCO Software Inc.). Las medianas se compararon con Kruskal-Wallis.

Resultados

En la serie de tiempo de los HAP cancerígenos en $PM_{2.5}$ (**Figura VI.2**), se observaron dos periodos, el primero comprendido del 5 de noviembre al 7 de diciembre de 2018, donde la concentración de los HAP fue inferior a 1100 pg/m³. En el segundo periodo, del 8 al 15 de diciembre de 2018, los datos de concentración incrementaron hasta 3000 pg/m³.

La **Tabla VI.I**, presenta las métricas de los datos en ambos periodos. Las concentraciones de HAP fueron similares a las reportadas por Amador-Muñoz et al. (2020), determinadas en el mismo sitio que la campaña EQAA1, pero durante la temporada de seca fría y caliente, de noviembre 2016 a marzo del 2017.

Se registraron tres máximos de concentraciones atípicas > 4500 pg/m³ durante noviembre, en los días 8 (20:26 h), 9 (01:16 h) y 14 (19:16 h), que, a diferencia del resto de las observaciones, corresponden a eventos puntuales no periódicos.

La **Figura VI.3**, presenta la serie de tiempo del reteno, un HAP marcador de la quema de biomasa. Se observaron máximos en los mismos días y horas que los HAP cancerígenos, además de otros máximos en noviembre 18 (20:43 h, 23:28 h) y 26 (13:28 h); en diciembre 12 (01:31 h, 8:25 h) y 14 (22:18 h), los cuales indican eventos puntuales de quema de madera.

Los resultados sugieren que los máximos descritos anteriormente en la **Figura VI.2**, fueron originados

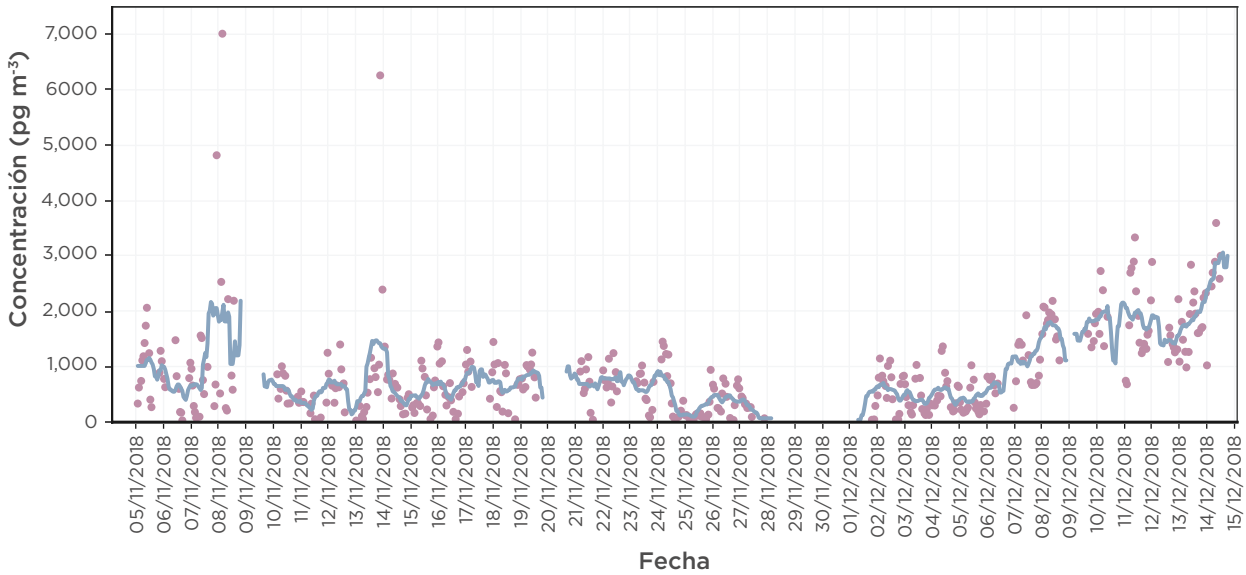


Figura VI.2. Serie de tiempo de HAP cancerígenos (BaA+Cris+BbF+BkF+BjF+BaP+I123cdP) en $PM_{2.5}$ determinados con resolución horaria al suroeste de la Ciudad de México, del 5 de noviembre al 15 de diciembre de 2018. La línea azul indica el promedio móvil de los datos y los puntos son los datos de HAP cancerígenos.

Tabla VI.1. Mediana (Med), promedio (Prom), desviación estándar (DE), máximo (Max) de los HAP cancerígenos y el reteno en $PM_{2.5}$ durante 2018. Unidades en pg/m^3

		Noviembre 5 a diciembre 7				Diciembre 8 a 15			
HAP	**Abreviación**	**Prom**	**de**	**Max**	**Med**	**Prom**	**de**	**Max**	**Med**
Benzo[a]antraceno	BaA	99	108	1123	80	310	83	620	297
Criseno	Cris	123	109	1033	102	362	127	1036	341
Benzo[b]fluoranteno	BbF	152	114	1191	133	375	127	766	365
Benzo[k]fluoranteno	BkF	84	71	771	70	253	67	386	259
Benzo[j]fluoranteno	BjF	102	89	885	87	137	62	328	129
Benzo[a]pireno	BaP	158	169	1618	130	365	130	785	340
Indeno[1,2,3-cd] pireno	I123cdP	152	93	673	134	343	98	553	327
Suma HAP cancerígenos	**HAP**	**660**	**673**	**7020**	**573**	**1758**	**649**	**3605**	**1642**
Reteno	**Ret**	**122**	**105**	**1080**	**95**	**174**	**157**	**914**	**125**

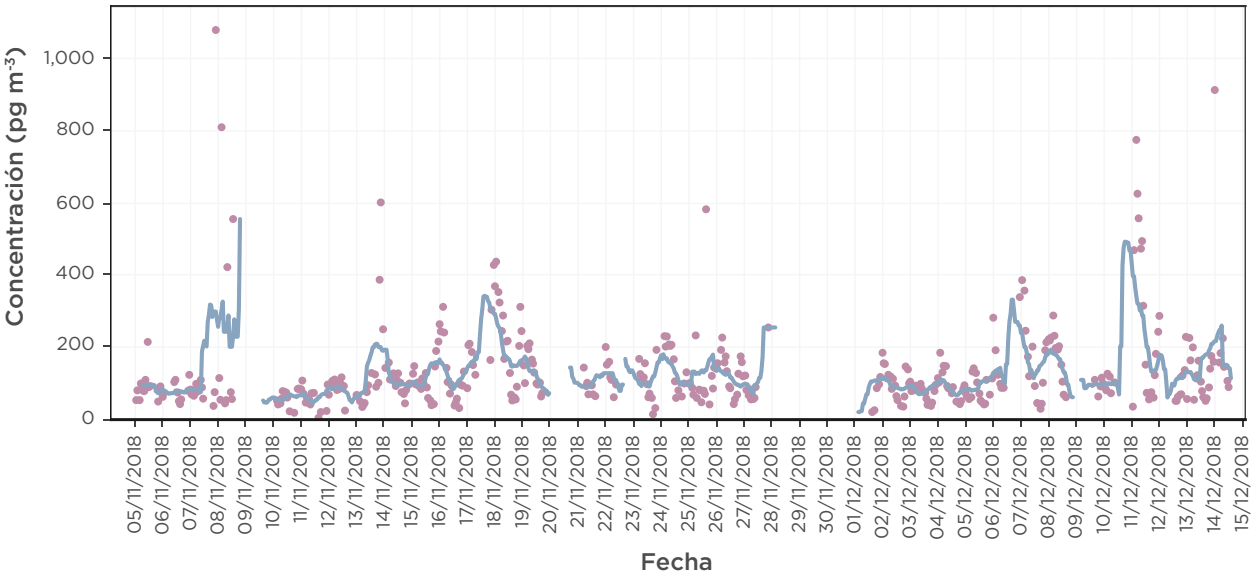


Figura VI.3. Serie de tiempo del reteno, marcador de la quema de biomasa de madera suave, en $PM_{2.5}$ determinados con resolución horaria al suroeste de la Ciudad de México, del 5 de noviembre al 15 de diciembre de 2018. La línea azul indica el promedio móvil de los datos y los puntos son los datos del reteno.

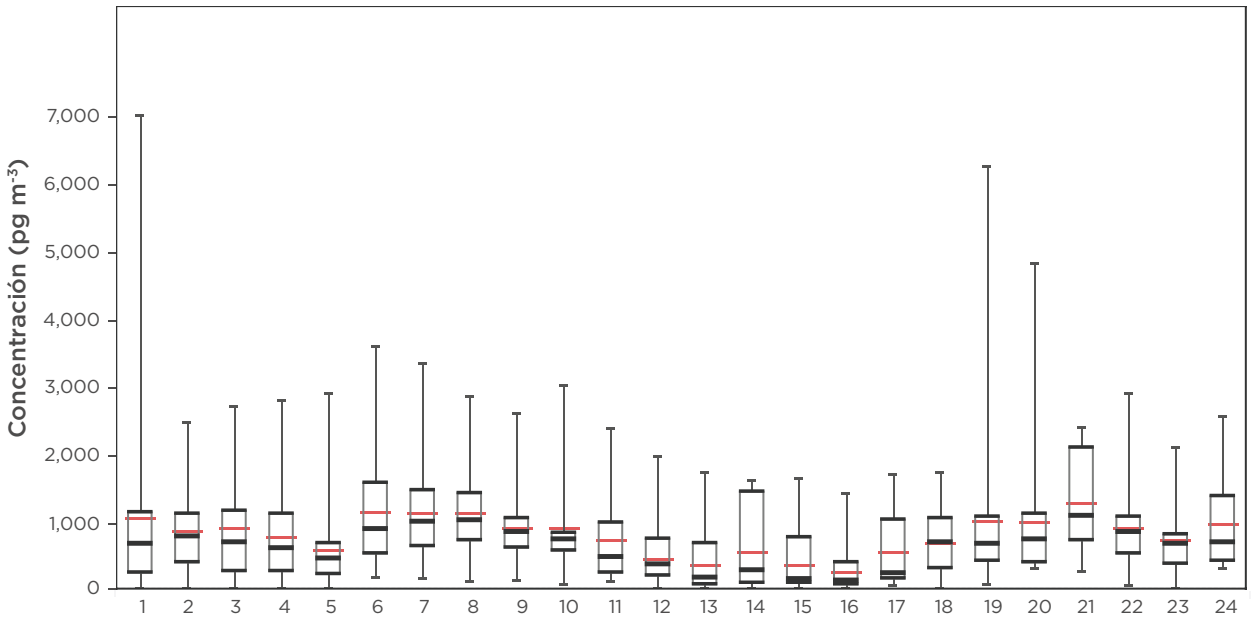


Figura VI.4. Variabilidad horaria de HAP cancerígenos en $PM_{2.5}$ al suroeste de la Ciudad de México, del 5 de noviembre al 15 de diciembre de 2018. La línea roja representa el promedio, la caja el rango intercuartil (percentil 75 y 25), la línea negra dentro de la caja es la mediana y los valores de los bigotes señalan el máximo y mínimo de los datos.

por eventos menores de quema de biomasa en los alrededores del sitio de colecta. Los tres máximos observados en la **Figura VI.3**, aparentemente fueron enmascarados por las altas concentraciones de HAP cancerígenos en el segundo periodo, con casi tres veces la concentración observada en el primer periodo ($p<0.001$) (**Tabla VI.I**).

La variación horaria de los HAP cancerígenos (**Figura VI.4**) presentó dos máximos, uno por la mañana (7:00-8:00 h) y otro por la noche (21:00 – 22:00 h). Distribución que coincide con el comportamiento horario del CO y NOx, relacionados con el flujo vehicular.

El perfil horario del reteno se presenta en la **Figura VI.5a** y se puede observar que el ciclo diurno-nocturno del reteno fue diferente al mostrado por los HAP cancerígenos. La mayor concentración del reteno se registró en el periodo nocturno, con

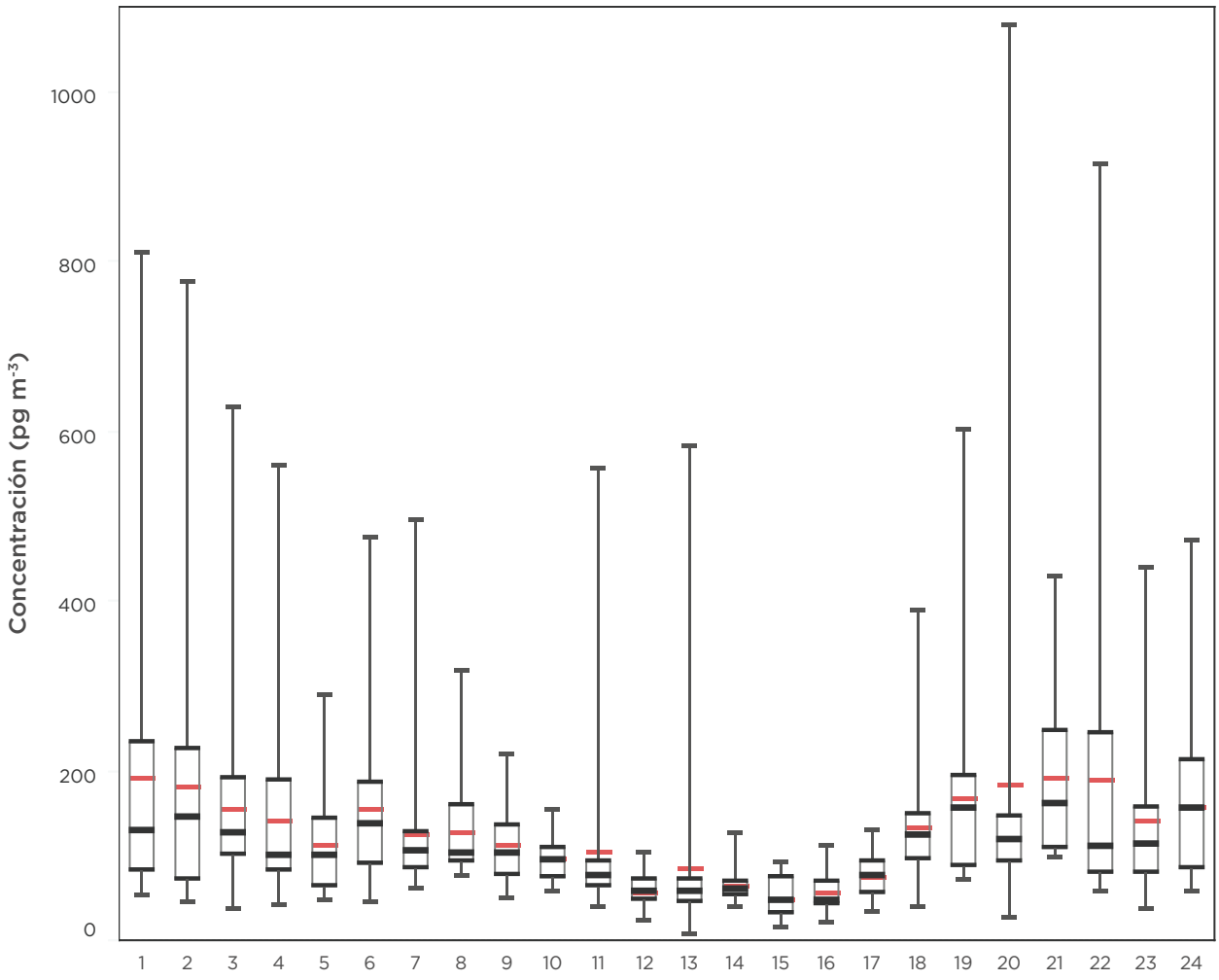


Figura VI.5. a) Variabilidad horaria del reteno en $PM_{2.5}$ al suroeste de la Ciudad de México, del 5 de noviembre al 15 de diciembre de 2018. La línea roja representa el promedio, la caja el rango intercuartil (percentil 75 y 25), la línea negra dentro de la caja es la mediana y los valores de los bigotes señalan el máximo y mínimo de los datos.

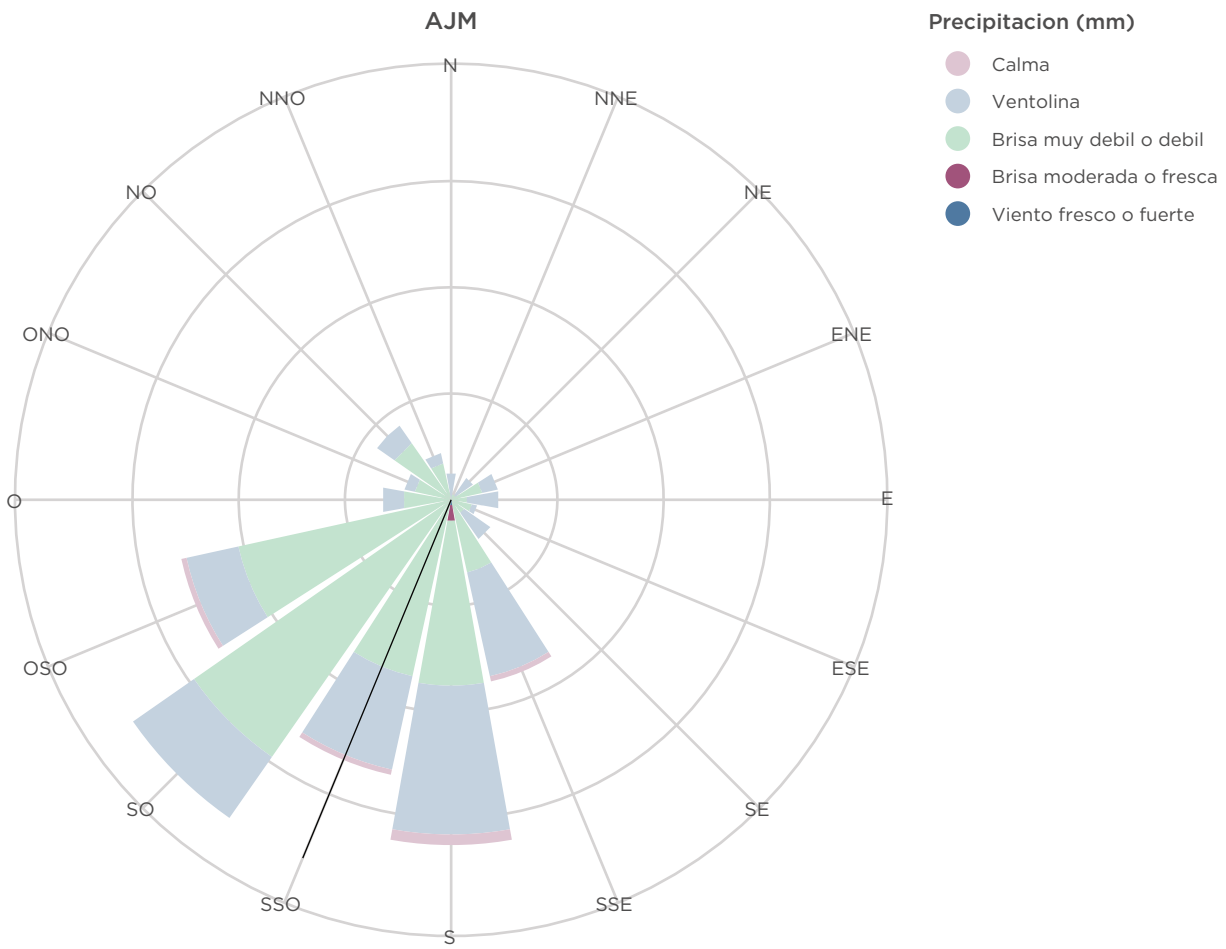


Figura VI.5. b) Rosa de viento de la estación AJM de las 21:00 a 05:00 h. La línea negra corresponde al viento dominante en dicha estación y horario.

máximos entre 21:00 h, 22:00 h y 2:00 h. La serie de tiempo y el perfil horario del reteno (**Figuras VI.3** y **VI.5a**) sugieren que la quema de biomasa es una fuente importante de $PM_{2.5}$ al suroeste de la Ciudad de México y que, además, es una actividad recurrente, probablemente desarrollada para la cocción de alimentos y el calentamiento de los hogares. Para relacionar la concentración del reteno en las horas que presentó el máximo, se analizó la rosa de viento de la estación Ajusco Medio (AJM) de las 21:00 a las 5:00 h, se observó que el viento dominante proviene del suroeste (**Figura VI.5b**)

La distribución diaria de los HAP cancerígenos (**Figura VI.6a**) originados principalmente por fuentes vehiculares, presenta la mayor concentración el viernes con respecto al lunes y jueves ($p<0.05$). Este comportamiento es similar al observado para los óxidos de nitrógeno (SEDEMA, 2018a).

Por el contrario, para el reteno no se observó una variación diaria ($p>0.05$), lo que sugiere que la quema de biomasa es una actividad frecuente, no cíclica (**Figura VI.6b**).

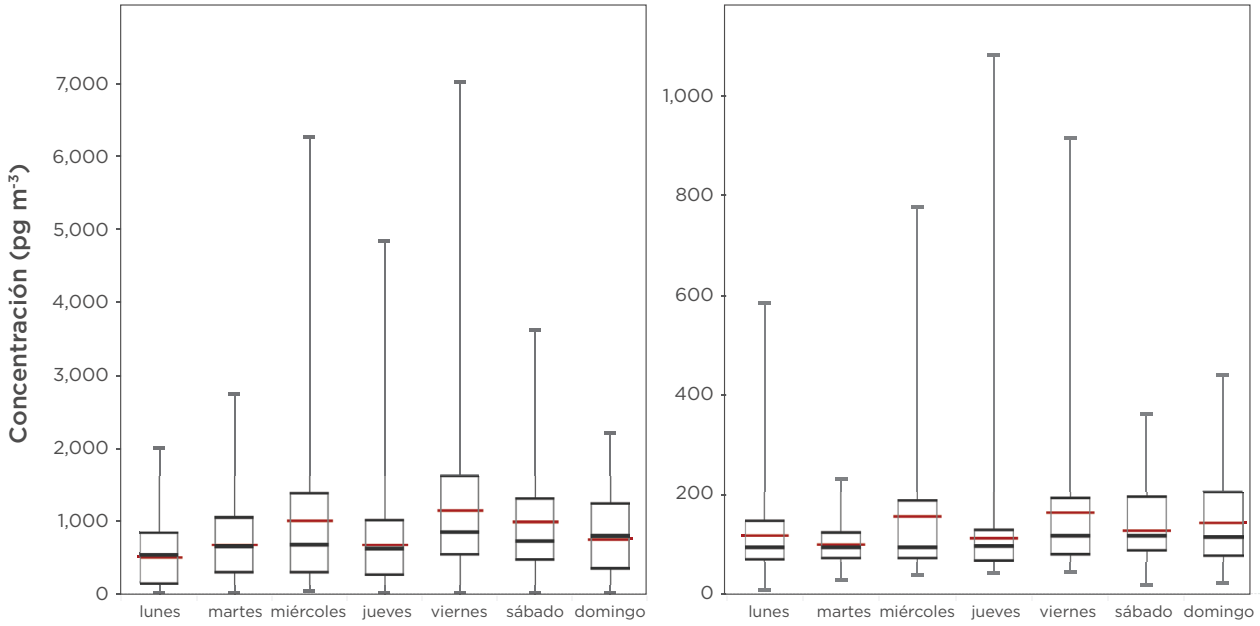


Figura VI.6. Distribución de la concentración por día de la semana, del 5 de noviembre al 5 de diciembre de 2018, al suroeste de la Ciudad de México, para: **a)** HAP cancerígenos en $PM_{2.5}$. **b)** Reteno en $PM_{2.5}$. La línea roja representa el promedio, la caja el rango intercuartil (percentil 75 y 25), la línea negra dentro de la caja es la mediana y los valores de los bigotes señalan el máximo y mínimo de los datos.

Conclusiones

La presencia de HAP cancerígenos en las $PM_{2.5}$ representa un riesgo a la salud. Sin embargo, en el estudio por Amador-Muñoz et al. (2020), recientemente mostraron que su concentración es aproximadamente 40% menor que los determinados hace una década (Amador-Muñoz et al. 2011), esto es un indicador de que las estrategias, programas y políticas públicas implementadas por los gobiernos de la Ciudad de México y Federal, han sido efectivas. Aunque la comparación de los HAP reportados en este informe (**Tabla VI.I**) no son directamente comparables con los reportados hace una década con métodos "off-line" debido a las diferencias entre metodologías, la tendencia también indica una reducción de HAP cancerígenos. Lo que representa un beneficio a la salud de la población.

En México, los HAP no están regulados en la normatividad nacional. El benzo[a]pireno se considera como el marcador de los HAP (EU, 2004; US EPA, 2015; Guerreiro et al. 2016; Hayakawa, 2018), clasificado en el grupo 1 como cancerígeno para humanos (IARC, 2012). El benzo[a]pireno reportado en este informe (<0.4 ng/m^3, **Tabla VI.1**), fue <1 ng/m^3 establecido por la Directiva Europea (EU, 2004) como promedio anual en PM_{10}, sin embargo, fue >0.12 ng/m^3 recomendado por la Organización Mundial de la Salud (de Leeuw et al., 2011; Hayakawa, 2018). Lo que sugiere continuar y reforzar las medidas adoptadas por los diferentes programas ambientales.

Referencias

Amador-Muñoz O., Villalobos-Pietrini R., Agapito-Nadales M. C., Munive-Colín Z., Hernández-Mena L., Sánchez-Sandoval M., Gómez-Arroyo S., Bravo-Cabrera J.L., Guzmán-Rincón J. (2010). Solvent extracted organic matter and polycyclic aromatic hydrocarbons distributed in size-segregated airborne particles in a zone of México City: Seasonal behavior and human exposure. Atmospheric Environment 44, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.012

Amador-Muñoz O., Villalobos-Pietrini R., Miranda J., Vera-Avila L. E. (2011). Organic compounds of PM2.5 in Mexico Valley: spatial and temporal patterns, behavior and sources. Science of the Total Environment 409, 1453–1465. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.026

Amador-Muñoz O., Bazán-Torija S., Villa-Ferreira S. A., Villalobos-Pietrini R., Bravo-Cabrera J. L., Munive-Colín Z., Hernández-Mena L., Saldarriaga-Noreña H., Murillo-Tovar M. A. (2013). Opposing seasonal trends for polycyclic aromatic hydrocarbons and PM10, health risk and sources in Southwest Mexico City. Atmospheric Research 122, 199-212. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.003

Amador-Muñoz O., Martínez-Domínguez Y. M., Gómez-Arroyo, S. Peralta O. (2020). Current situation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in PM2.5 in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques. Science of the Total Environment 703, 134526. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134526

Andreae, M. O. (1995). Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: Future Climates of the World: a Modelling Perspective. Elsevier, Países Bajos, Ámsterdam. https://cutt.ly/4f0Ojge

Andreae M.O., Gelencsér, A. (2006) Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 3131-3148. https://cutt.ly/cfBrdE0

Baron P. A. y Willeke K. (2001). Aerosol Fundamental. En: Principles, techniques and applications (2da ed., pp. 45-60) Wiley-Interscience. https://doi.org/10.1021/ja015375e

Bravo J. L., Amador-Muñoz O., Villalobos-Pietrini R., Muhlia A. (2006). Influence of some meteorological parameters and forest fires on PM10 concentrations in a Southwest zone of Mexico Valley. International Journal of Environment and Pollution 26(1-3), 142-155. https://doi.org/10.1504/IJEP.2006.009103

Cámara Minera de México. (2019). Informe de la octogésima segunda asamblea general ordinaria de la Cámara Minera de México: Informe Anual 2019. https://cutt.ly/xfBtAsr

Cassee, F. R., Héroux, M. E., Gerlofs-Nijland, M. E., & Kelly, F. J. (2013). Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission. Inhalation Toxicology, 25(14), 802-812. https://doi.org/10.3109/08958378.2013.850127

Cheng Z., Luo L., Wang S., Wang Y., Sharma S., Shimadera H., Wang X., Bressi M., de Miranda R. M., Jiang J., Zhou W., Fajardo O., Yan N., Hao J. (2016). Status and characteristics of ambient PM2.5 pollution in global megacities. Environment International, 89-90, 212-221. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.003

Day A.D., Ludeke K.L. (1993). Soil Acidity. In: Plant Nutrients in Desert Environments. Adaptations of Desert Organisms. Springer, Berlin, Heidelberg. https://cutt.ly/kfBrcrh

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L. T., Molina, M. J. (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 2267–2288. https://doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005

de Foy, B., Krotkov, N.A., Beir, N., Herndon, S.C., Huey, L.G., Martínez, A.P., Ruiz-Suárez, L.G., Wood, E.C., Zavala, M., Molina, L.T. (2009). Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO2 retrievals during the MILAGRO field campaign. Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 9599–9617. https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009

de Leeuw, F., Ruyssenaars, P. (2011). Evaluation of current limit and target values as set in the EU Air Quality Directive, ETC/ACM Technical Paper 2011/3. Eionet Portal. https://cutt.ly/QfBrQYG

Donaldson, K., Gilmour, M. I., & MacNee, W. (2000). Asthma and PM10. Respiratory research, 1(1), 12–15. https://doi.org/10.1186/rr5

Fang, T., Guo, H., Zeng, L., Verma, V., Nenes, A., Weber, R.J. (2017). Highly acidic ambient particles, soluble metals, and oxidative potential: a link between sulfate and aerosol toxicity. Environmental Science and Technology, 51 (5), 2611–2620. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06151

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland, R. (2007) Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. https://cutt.ly/9fBrTe6

Gobierno de la Ciudad de México. (2016). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2016: Aviso por el que se da a conocer el Programa Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. https://cutt.ly/fgp88oH

Gobierno de la Ciudad de México. (2018). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018: aviso por el que se da a conocer la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2017, que establece los requisitos para elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México. https://cutt.ly/MfBrOD4

Goldstein A. H. y Galbally I. E. (2007). Known and unexplored organic constituents in the earth's atmosphere. Environmental Science and Technology, 41, 1515-1521. https://cutt.ly/EfBrS6T

Guerreiro, C. B. B., Horálek, J., de Leeuw, F., & Couvidat, F. (2016). Benzo (a) pyrene in Europe: Ambient air concentrations, population exposure and health effects. Environmental pollution, 214, 657-667. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.081

Hayakawa, K. (2018). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons environmental behavior and toxicity in east Asia; Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6775-4

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 pp. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf

International Agency for Research on Cancer (IARC). (1983). Polynuclear aromatic compounds, part 1, chemical, environmental, and experimental data. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man, IARC Scientific Publications, 32, 33-451. ISBN 978-92-832-1232-4

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2010). Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures (Vol. 92). IARC Press, International Agency for Research on Cancer. http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol92/index.php

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). Chemical agents and related occupations. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 100, 249-294. https://cutt.ly/jfBrHQl

Jacobson, M. (2012). Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139109444.0020

Lazaridis, M. (2011). First Principles of Meteorology and Air Pollution. Springer, Dordrecht. https://cutt.ly/hfBtKWv

Miller, M. R. (2020). Oxidative stress and the cardiovascular effects of air pollution. Free Radical Biology and Medicine, 151, 69-87. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.01.004

Ministry of the Environment and Climate Change, Canada. (2017). Air Quality in Ontario: 2015 Report. http://www.airqualityontario.com/downloads/AirQualityInOntarioReportAndAppendix2015.pdf

Mugica, V., Hernández, S., Torres, M., & García, R. (2010). Seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure levels in Mexico City. Journal of the Air & Waste Management Association, 60(5), 548-555. https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.548

National Atmospheric Deposition Program (NADP). (2017). National Atmospheric Deposition Program 2016 Annual Summary: 21 Years of MDN. Estados Unidos: Illinois State Water Survey. http://nadp.slh.wisc.edu/lib/data/2016as.pdf

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2018). Cold & Warm Episodes by Season. https://cutt.ly/FfBt0Q1

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Center for Environmental Information (NCEI). (2019). Global Temperature and Precipitation Maps. https://cutt.ly/Lf0PIA6

Official Journal of the European Union (EU). (2004). Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:EN:PDF

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2003). Global Solar UV Index: A Practical Guide. https://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf?ua=1

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de los riesgos. https://cutt.ly/qfBr0c8

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2012). Health effects of Black Carbon. Regional office for Europe. https://cutt.ly/vfBt52C

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. https://cutt.ly/DfBr9MV

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Calidad del Aire y Salud. https://cutt.ly/4fBr4qy

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). (2004). Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH_3, NO y NO_2 provenientes de las tierras agrícolas. http://www.fao.org/3/a-y2780s.pdf

Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X.Y. (2013). Recommendations for reporting "black carbon" measurements. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 8365-8379. https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013

Philip S., Martin R. V., van Donkelaar A., Lo J. W. H., Wang Y., Chen D., Zhang L., Kasibhatla P. S., Wang S., Zhang Q., Lu Z., Streets D. G., Bittman S., Macdonald D. J. (2014). Global chemical composition of ambient fine particulate matter for exposure assessment. Environmental science & technology, 48(22), 13060-13068. https://doi.org/10.1021/es502965b

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización Meteorológica Mundial. (2011). Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12414#.X34NNmhKjcc

Ramdahl T. (1983). Retene–a molecular marker of wood combustion in ambient air. Nature, 306(5943), 580-582. https://doi.org/10.1038/306580a0

Retama A, Neria-Hernández A., Jaimes-Palomera M., Rivera-Hernández O., Sánchez-Rodríguez M., López-Medina Al., Velasco E. (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico City. Atmospheric Environment: X (2). https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100013

Ryaboshapko, A. A., Oyola, P. O., Lissi, E. A., Rubio, M. A. (1998). Composición química de hidrometeoros en la atmósfera de Santiago-Chile. Información Tecnológica, 9, p.123.

Salcedo, D., Onasch, T. B., Dzepina, K., Canagaratna, M. R., Zhang, Q., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Jayne, J. T., Mortimer, P., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Johnson, K. S., Zuberi, B., Marr, L. C., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Cardenas, B., Bernabé, R. M., Márquez, C., ... Jimenez, J. L. (2018). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: Results from the CENICA Supersite. Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 925–946. https://doi.org/10.5194/acp-6-925-2006

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2017). Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6BhnmI=

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018a). Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6BhnmI=

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018b). Inventario de emisiones de la Ciudad de México 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6BhnmI=&dc=Zg==

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2018a). Reporte anual del clima en México. https://cutt.ly/vfBtiR1

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2018b). Reporte del clima en México: Noviembre 2018. https://cutt.ly/RfBtaQm

Stephens, S., Madronich, S., Wu, F., Olson, F., Ramos, R., Retama, A., Munoz, R. (2008). Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of CO, NOx, PM10 and O3 during 1986–2007. Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 5313–5325. https://www.atmos-chem-phys.net/8/5313/2008/acp-8-5313-2008-discussion.html

Turco, R. P. (2002). Earth under Siege: From Air Pollution to Global Change (2da ed.) Oxford University Press. ISBN: 978-0195142747.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2009). Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards: Scope and Methods Plan for Health Risk and Exposure Assessment. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100FLWP.PDF?Dockey=P100FLWP.PDF

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2012). Report to Congress on Black Carbon, Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act. https://cutt.ly/6fBtfHY

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2014). Air Quality Index. A guide to Air Quality and your Health. https://cutt.ly/7f0Aqvu

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2015). 2013 National Monitoring Programs Annual Report (UATMP, NATTS, CSATAM). https://cutt.ly/SfBthQz

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2016). Lead (Pb) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). https://cutt.ly/xfBtkww

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2017). Our Nation's Air: Air quality status and trends through 2017. https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2018/

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2019). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table

Vásquez Morera, T., Alfaro Solís, R., Sibaja Brenes, J., Esquivel Hernández, G., & Valdés González, J. (2012). Chemical composition of rain and fog water collected in the Monteverde biological reserve. Uniciencia, 26(1-2), 51-64. https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/3862

Villalobos-Pietrini R., Amador-Muñoz O., Waliszewski S., Hernández-Mena L., Munive-Colín Z., Gómez-Arroyo S., Bravo-Cabrera J. L., Frías-Villegas A. (2006). Mutagenicity and polycyclic aromatic hydrocarbons associated with extractable organic matter from airborne particles ≤ 10 µm in southwest México City. Atmospheric Environment 40(30), 5845-5857. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.009

Yang, L., Gao, X., Wang, X., Nie, W., Wang, J., Gao, R., ... & Wang, W. (2014). Impacts of firecracker burning on aerosol chemical characteristics and human health risk levels during the Chinese New Year Celebration in Jinan, China. Science of the Total Environment, 476, 57-64. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713016008

ANEXO I

Configuración del Sistema de Monitoreo Atmosférico

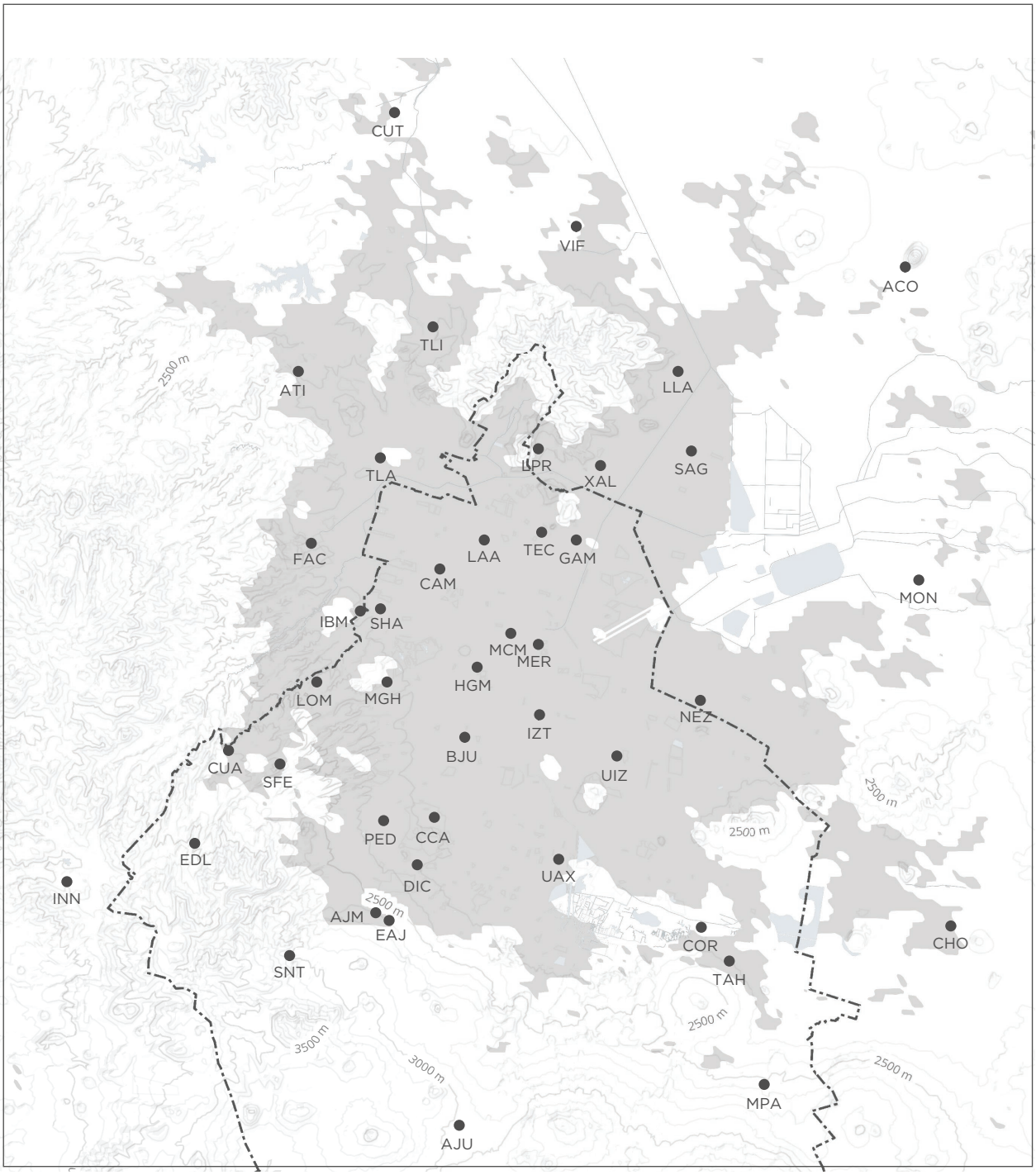


Figura A.I.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

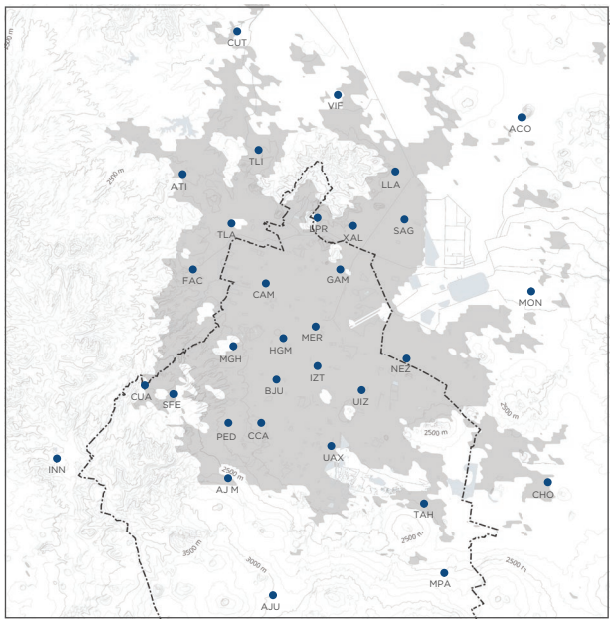


Figura A.I.2. Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2018.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

Figura A.I.3. Estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2018.

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

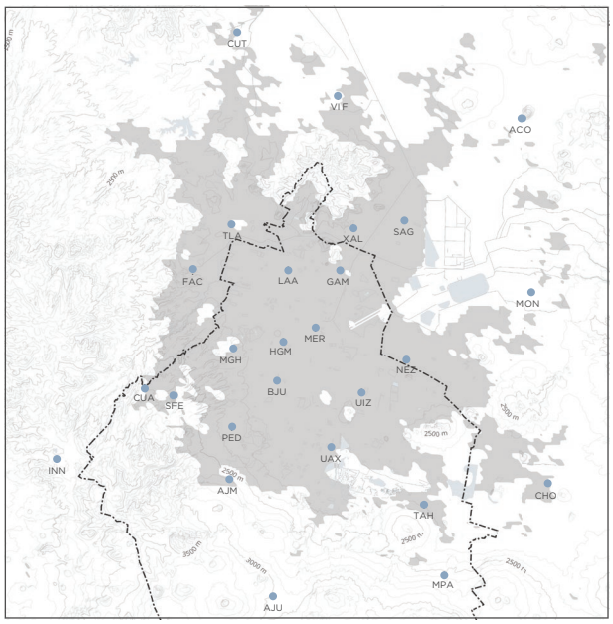


Figura A.I.4. Estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar en operación durante 2018.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

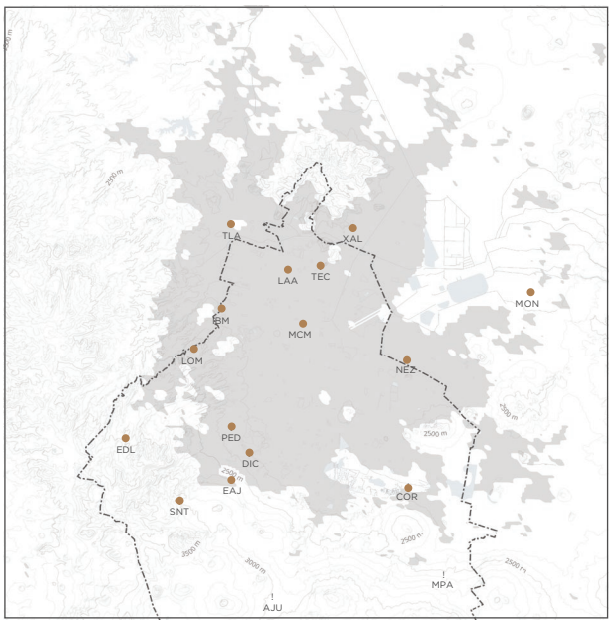


Figura A.I.5. Estaciones de la Red de Depósito Atmosférico en operación durante 2018.

Tabla A.I.1. Estaciones que integran la Red Automática de Monitoreo Atmosférico. Los parámetros que mide cada estación se encuentran sombreados.

					Parámetros						
Entidad	**Delegación o Municipio**	**Estación**	**Clave**	**Inicio de Operación**	**O_3**	**NO_2**	**CO**	**SO_2**	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**$PM_{10-2.5}$**
Ciudad de México	Alvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986							
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago – 2003							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
	Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	Ago – 2014							
		UAM Xochimilco	UAX	Feb – 2012							
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov – 1993							
		Santa Fe	SFE	Feb – 2012							
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb - 2012							
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul – 2007							
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1986							
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene – 2015							
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016							
	Tlalpan	Ajusco	AJU	Ene – 2015							
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov – 1993							
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2007							
	Atizapán	Atizapán	ATI	Nov – 1993							
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2007							
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Nov – 1993							
	Ecatepec	Los Laureles	LLA	Feb – 1986							
		San Agustín	SAG	Feb – 1986							
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986							
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Ago – 2015							
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
	Texcoco	Montecillo	MON	Nov – 1993							
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene – 1986							
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986							
	Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov – 1993							

Tabla A.I.2. Estaciones que integran la Red Manual de Monitoreo Atmosférico. Los parámetros que mide cada estación se encuentran sombreados.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros				
					PST	PM_{10}	$PM_{2.5}$	Pb-PST	Pb-PM_{10}
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1989					
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1989					
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene – 1989					
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1989					
Estado de México	Ecatepec	San Agustín	SAG	Ago – 2003					
		Xalostoc	XAL	Ene – 1989					
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene – 1989					
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene – 1989					
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1989					

Tabla AI.3. Estaciones que integran la Red de Meteorología y Radiación Solar. Los parámetros que mide cada estación se encuentran sombreados.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros						
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-A	RUV-B	PA
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Abr – 2015							
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun – 2000							
		Santa Fe	SFE	Feb – 2012							
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb – 2012							
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
		Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	Ene – 2016							
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr – 2014							
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb – 2015							
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016							
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May – 2015							
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun – 2000							
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2011							
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2011							
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun – 2000							
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb – 1986							
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986							
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep – 2015							
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun – 2000							
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986							

Tabla A.I.4. Estaciones que integran la Red de Depósito Atmosférico. Los parámetros que mide cada estación se encuentran sombreados.

					Parámetros					
Entidad	**Delegación o Municipio**	**Estación**	**Clave**	**Inicio de operación**	**Pp**	**pH**	**H+**	**CE**	**Aniones**	**Cationes**
Ciudad de México	Cuajimalpa	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	May - 1998						
	Cuauhtémoc	Museo de la Ciudad de México	MCM	Jun - 1989						
	Gustavo A. Madero	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	Jun - 1995						
		Cerro del Tepeyac	TEC	Ago - 1988						
	La Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	Ago - 1998						
	Miguel Hidalgo	Legaria	IBM	Jun - 1989						
		Lomas	LOM	Jun - 1988						
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	May - 1998						
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May - 1998						
		Diconsa	DIC	Jun - 1988						
		Ecoguardas Ajusco	EAJ	Jun - 1998						
	Xochimilco	CORENA	COR	Jun - 1990						
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	May - 1989						
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jun - 1991						
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 1994						
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Jun - 1989						

ANEXO II

Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Tabla AII.1. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en la Ciudad de México, durante 2018.

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2	22/09/2018	18:00	12/10/2018	00:00	CPP desconfigurado
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	O_3, SO_2, CO, NO, NO_2, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	01/01/2018	00:00	17/12/2018	00:00	Fallo en el sistema de aire acondicionado
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	20/03/2018	22:00	05/05/2018	00:00	Retiro del monitor para su revisión en laboratorio. Fallo en el sistema de aire acondicionado
				SO_2, O_3, NO, NO2, NOx	10/04/2018	23:00	04/05/2018	00:00	Fallo en el sistema de aire acondicionado
				SO_2	12/10/2018	01:00	15/11/2018	01:00	Retiro del analizador para servicio en laboratorio. Fallo en el sistema de aire acondicionado
Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	RAMA	SO_2	01/01/2018	00:00	16/11/2018	00:00	Sin equipo hasta su reinstalación
				NO_2	16/11/2018	01:00	31/12/2018	23:00	Datos inválidos por pérdida de suficiencia de información anual.
Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	RAMA	O_3	01/01/2018	00:00	23/01/2018	00:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				NO, NO_2, NOx	27/05/2018	01:00	19/06/2018	01:00	Fallo en TIN. Se apaga instrumentación.
				$PM_{2.5}$	10/07/2018	00:00	25/08/2018	02:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio. Falla en la reinstalación
	UAM Xochimilco	UAX	RAMA	CO, $PM_{2.5}$, NO, NO_2, NOx, SO_2, O_3	04/06/2018	12:00	26/06/2018	00:00	Estación sin instrumentación. Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	O_3	18/01/2018	01:00	02/02/2018	02:00	Retiro del equipo para mantenimiento
	Santa Fe	SFE	RAMA	CO	30/08/2018	18:00	21/09/2018	03:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	30/08/2018	18:00	23/09/2018	23:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				NO, NO_2, NOx, SO_2, CO	21/05/2018	11:00	12/06/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				NO, NO_2, NOx	16/07/2018	22:00	30/11/2018	00:00	Retiro de analizadores
			REDMET	RH	07/04/2018	09:00	09/05/2018	00:00	Invalidación de registros por comportamiento irregular
				RH	03/06/2018	22:00	01/07/2018	00:00	Invalidación de registros por comportamiento irregular
				TMP	16/04/2018	16:00	09/05/2018	00:00	Invalidación de registros por comportamiento irregular
				RH	12/08/2018	22:00	31/12/2018	23:00	Invalidación de registros por comportamiento irregular
				WDR, WSP	12/02/2018	23:00	09/05/2018	00:00	Sensor sobreestimado

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	REDMET	WDR, WSP	15/05/2018	23:00	28/06/2018	00:00	Falla de sensor, veleta trabada
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	31/01/2018	12:00	13/03/2018	15:00	Datos perdidos o dañados en tránsito
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	O_3	11/03/2018	23:00	16/04/2018	03:00	Retiro del equipo mantenimiento en laboratorio
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	O_3	01/01/2018	00:00	23/01/2018	00:00	Instalación y validación del equipo de ozono
				CO	01/01/2018	00:00	28/02/2018	01:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				NO, NO_2, NOx	03/04/2018	23:00	05/05/2018	01:00	Sin comunicación por ambos sistemas
				NO, NO_2, NOx	29/05/2018	11:00	22/06/2018	01:00	Fuera de línea por fallos en los registros
				CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2, PM_{10}	15/08/2018	23:00	13/09/2018	00:00	CFE suspende el servicio de energía eléctrica en la estación
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	01/01/2018	00:00	22/03/2018	00:00	Fuera de línea por falta de suministros
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	30/09/2018	16:00	08/11/2018	00:00	Retiro de los equipos para mantenimiento preventivo
				CO	22/10/2018	15:00	23/11/2018	00:00	Equipo en acondicionamiento
			REDMET	WDR, WSP	26/02/2018	16:00	14/06/2018	00:00	Fuera de línea por mantenimiento
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	REDMET	TMP	26/02/2018	16:00	21/06/2018	00:00	Mantenimiento para reemplazo del ventilador
				RH	26/02/2018	16:00	31/12/2018	23:00	Retiro del sensor para pruebas en laboratorio
				TMP	10/10/2018	23:00	25/10/2018	00:00	Fuera de línea por fallos en el sensor
				WDR, WSP	10/10/2018	23:00	25/10/2018	00:00	Fuera de línea por causa de un falso contacto
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	O_3	29/01/2018	23:00	14/02/2018	00:00	Retiro del equipo de Ozono para mantenimiento a partículas
				CO, NO, NO_2, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	20/08/2018	07:00	07/09/2018	00:00	Retiro de instrumentación para mantenimiento en laboratorio
				SO_2	20/08/2018	06:00	06/12/2018	00:00	Retiro de instrumentación para mantenimiento en laboratorio
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	11/01/2018	02:00	13/02/2018	22:00	Datos inválidos por pérdida de suficiencia anual
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	13/02/2018	23:00	11/04/2018	23:00	Se apaga monitor de partículas debido a reducción de costos
				CO, O_3, SO_2	22/02/2018	09:00	03/04/2018	09:00	Realización de pruebas para la nueva versión de AirVision
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	21/04/2018	19:00	01/06/2018	01:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	03/06/2018	01:00	31/12/2018	23:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				CO, O_3, SO_3	19/09/2018	16:00	22/10/2018	14:00	CPP desconfigurado por fallas eléctricas
				NO_2	16/11/2018	01:00	31/12/2018	23:00	Datos inválidos por pérdida de suficiencia de información anual
			REDMET	RH, TMP, WSP, WDR	22/02/2018	09:00	26/04/2018	00:00	Realización de pruebas para la nueva versión de AirVision
				RH, TMP, WSP, WDR	22/09/2018	07:00	23/10/2018	00:00	CPP bloqueado

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	RAMA	O_3	19/01/2018	23:00	07/02/2018	00:00	Baja del canal por registros irregulares
	Ajusco	AJU	RAMA	O_3	01/02/2018	01:00	04/05/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento preventivo.
				$PM_{2.5}$	13/05/2018	17:00	01/06/2018	02:00	Incremento en TIN. Presenta valores irregulares
				$PM_{2.5}$	14/06/2018	09:00	14/07/2018	22:00	Reporte del equipo por registro de valores negativos y ceros
			REDMET	RH	06/09/2018	01:00	23/10/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento
Venustiano Carranza	Merced	MER	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	21/04/2018	00:00	02/06/2018	02:00	Fallo en bomba y registro de valores negativos e irregulares
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	18/05/2018	21:00	02/06/2018	00:00	Datos inválidos por valores negativos y ceros continuos
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	CO, SO_2	28/02/2018	23:00	05/06/2018	03:00	Fuera de línea por registros irregulares
				NO, NO_2, NOx	10/03/2018	16:00	08/12/2018	11:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				PM_{10}	08/03/2018	23:00	05/06/2018	02:00	Sin comunicación por ambos sistemas. Incremento en TIN
				O_3	10/03/2018	16:00	05/06/2018	03:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				PM_{10}	05/06/2018	02:00	03/07/2018	23:00	Registros aislados
				PM_{10}	03/07/2018	23:00	23/07/2018	01:00	Fallo en sensor de temperatura del equipo de partículas
				PM_{10}	26/07/2018	12:00	08/08/2018	05:00	Sin comunicación por ambos sistemas
				SO_2	26/07/2018	13:00	14/08/2018	12:00	Sin comunicación por ambos sistemas
			REDMET	TMP, RH, WSP, WDR	10/03/2018	19:00	24/05/2018	00:00	Sin comunicación en ambos sistemas e incremento en TIN
				WSP, WDR	03/05/2018	18:00	24/05/2018	00:00	Sin datos, probable anemómetro trabado
				TMP, RH, WSP, WDR	23/06/2018	13:00	11/08/2018	00:00	Sin comunicación por ambos sistemas

Tabla AII.2. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios conurbados del Estado de México, durante 2018.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	CO, O_3, NO, NO_2, NOx, SO_2	22/02/2018	08:00	03/04/2018	13:00	Fallo en TIN. Se apaga instrumentación.
				PM_{10}	23/02/2018	08:00	04/04/2018	05:00	Fallo en TIN. Se apaga instrumentación.
				O_3, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}	26/06/2018	11:00	26/07/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento preventivo
				CO	30/06/2018	13:00	26/07/2018	00:00	Fallo en TIN. Se apaga instrumentación.
				CO, O_3, NO, NO_2, NOx, SO_2	14/10/2018	23:00	30/10/2018	00:00	Fallo en la comunicación
			REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	22/02/2018	09:00	03/04/2018	09:00	Realización de pruebas para la nueva versión de AirVision
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	O_3, PM_{10}, SO_2, CO	01/01/2018	00:00	14/02/2018	00:00	Fallo en el sistema de aire acondicionado
				NO, NO_2, NOx	01/01/2018	00:00	28/03/2018	01:00	Retiro del equipo para su revisión
				PM_{10}	14/05/2018	01:00	18/07/2018	02:00	Datos inválidos por registros irregulares
				NO, NO_2, NOx	15/05/2018	10:00	18/07/2018	01:00	Fuera de línea por fallo en los equipos
				CO, O_3	06/06/2018	14:00	18/07/2018	01:00	Sin comunicación por ambos sistemas
Coacalco	Villa de las Flores	VIF	RAMA	PM_{10}	10/02/2018	23:00	28/02/2018	23:00	Fuera de línea por TIN. Presenta registros irregulares
				CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2	10/02/2018	23:00	16/03/2018	00:00	Sin comunicación por ambos sistemas. Retiro de los equipos para mantenimiento
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	NO, NO_2, NOx	19/09/2018	23:00	24/11/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento
	San Agustín	SAG	RAMA	SO_2, NO, NO_2, NOx, CO	18/02/2018	23:00	03/03/2018	00:00	Retiro de los equipos para mantenimiento
				O_3	18/02/2018	23:00	10/03/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	15/07/2018	05:00	07/08/2018	01:00	Sin comunicación por ambos sistemas. Retiro de monitor
			REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	04/02/2018	23:00	27/02/2018	00:00	Registro de valores irregulares.
				RH	29/09/2018	23:00	20/12/2018	00:00	Registro de valores atípicos posterior a falla eléctrica
				TMP	29/09/2018	23:00	07/11/2018	23:00	Registro de valores atípicos posterior a falla eléctrica
Naucalpan	FES-Acatlán	FAC	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2, PM_{10}	13/04/2018	11:00	02/05/2018	01:00	Estación apagada por labores de impermeabilización
				CO	20/07/2018	01:00	16/08/2018	09:00	Registro de valores atípicos posterior a incremento en TIN
				PM_{10}	31/07/2018	00:00	27/08/2018	01:00	Fuera de línea por incremento en TIN
				SO_2	30/10/2018	00:00	24/11/2018	01:00	Fuera de línea por valores irregulares. Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
			REDMET	RH, TMP	13/04/2018	11:00	24/08/2018	01:00	Fuera de línea por trabajos de impermeabilización
				WDR, WSP	13/04/2018	11:00	02/05/2018	01:00	Fuera de línea por trabajos de impermeabilización
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, O_3	31/01/2018	23:00	21/02/2018	00:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	02/05/2018	01:00	05/09/2018	02:00	Datos inválidos por comportamientos irregulares. Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				CO, O_3, SO_2	23/07/2018	00:00	25/08/2018	01:00	Sin comunicación por ambos sistemas
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	27/10/2018	23:00	18/12/2018	02:00	Fuera de línea por registro de valores negativos y ceros continuos
			REDMET	TMP	01/01/2018	00:00	23/05/2018	01:00	Sin sensor de temperatura
				TMP	23/05/2018	01:00	27/07/2018	13:00	Datos inválidos por pérdida de suficiencia de información anual
				TMP	27/07/2018	12:00	18/12/2018	00:00	Datos inválidos por estar fuera del rango
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	REDMET	RH, WDR, WSP	01/08/2018	14:00	23/08/2018	11:00	Estación sin comunicación
				RH, WDR, WSP	16/11/2018	16:00	20/12/2018	23:00	Fuera de línea por valores irregulares. Se retira tarjeta meteorológica
Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	REDMET	WSP, WDR	01/01/2018	00:00	15/05/2018	01:00	Fuera de línea por comportamiento irregular
				RH, TMP	27/03/2018	11:00	15/05/2018	00:00	Baja por comportamiento irregular de RH
				RH, TMP	25/06/2018	19:00	03/08/2018	01:00	Retiro de los equipos para mantenimiento
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	CO, NO, NO2, NOx, O_3, SO_2	05/11/2018	23:00	06/12/2018	00:00	Retiro de instrumentación en la estación
			REDMET	WSP, WDR	31/08/2018	22:00	07/11/2018	00:00	Valores sobreestimados
Tlalnepantla	La Presa	LPR	RAMA	O_3	13/01/2018	23:00	09/02/2018	00:00	Problemas en la bomba
	Tlalnepantla	TLA	RAMA	NO, NO_2, NOx	29/03/2018	23:00	17/04/2018	03:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				NO, NO_2, NOx	03/05/2018	07:00	24/05/2018	03:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMco	12/07/2018	23:00	28/07/2018	03:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio.
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	PM_{10}	09/01/2018	15:00	31/12/2018	23:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				NOx, NO_2, NO	26/07/2018	19:00	14/08/2018	00:00	Sin comunicación por ambos sistemas

ANEXO III

Cumplimiento de las metas del SIMAT establecidas en PROAIRE 2011 – 2020

Tabla A.III.1. Información sobre el estado actual del cumplimiento de las metas establecidas en PROAIRE 2011 – 2020.

ACCIÓN PROAIRE 2011-2020	ESTADO ACTUAL
Establecer nuevos niveles de activación para el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA)	• Se eliminó la fase de Precontingencia. • Se activa Fase I a más de 150 puntos por Ozono o por PM_{10}. • Se activa Fase II a más de 200 puntos por Ozono o PM_{10}. • El Pronóstico de la Calidad del Aire se toma como criterio para la activación de una contingencia por Ozono.
Actualizar las acciones incluidas en el PCAA	• El PCAA presenta una definición clara de las acciones que se aplicarán al activarse una contingencia y define claramente a los responsables de aplicarlas, así como las actividades posteriores a la contingencia.
Realizar diagnósticos del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)	• En 2015 se aplicaron dos evaluaciones de desempeño de la información generada para asegurar la calidad, la robustez y confiabilidad de los datos que proporciona el SIMAT. • Otra auditoria llevada a cabo en 2017, mostró que todos los sitios de monitoreo se encuentran en óptimas condiciones.
Reforzar el monitoreo de la calidad del aire	• El SIMAT mantiene en operación 43 estaciones de monitoreo atmosférico que evalúan la concentración de los contaminantes criterio, radiación solar UV, parámetros meteorológicos, lluvia ácida y ruido ambiental. • En noviembre de 2018 se publicó la Norma Local NADF-009-Aire-2017, que Establece los requisitos para elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México, que tiene como objetivo: establecer los lineamientos para la obtención, el uso y la comunicación de riesgos a la salud a través del Índice de Calidad del Aire para la CDMX.
Actualizar la información de calidad del aire dispuesta para el público	• La página web de Calidad del Aire es el principal medio de difusión del SIMAT, la cual se actualiza de manera continua, el link de acceso es el siguiente: http://www.aire.cdmx.gob.mx/ • Se cuenta con una aplicación gratuita para dispositivos móviles, que permite conocer la calidad del aire en tiempo real: https://play.google.com/store/apps/details?id=mx.gob.df.aire https://apps.apple.com/us/app/aire/id877636042?l=es&ls=1 • Presenta también una cuenta de Twiter: @aire_CDMX • Adicionalmente contiene el Pronóstico de Calidad del Aire a 24 horas y el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (los cuales se presentan más adelante).
Investigar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de la población	• La Universidad de Harvard analizó el impacto logrado por la aplicación de políticas de calidad del aire para mejorar la salud de la población de la CDMX, concluyendo que se han evitado muertes en la población e incrementado la esperanza de vida. • La Universidad de Nueva York presentó la propuesta de un indicador de calidad del aire relacionado con los efectos en la salud. La página web de Calidad del Aire contiene el sitio en donde se aloja el indicador llamado Índice de Riesgo de Personas Susceptibles (IRPS): • http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/
Realizar estudios sobre la dinámica y química atmosférica	• La CDMX cuenta con un sistema de pronóstico de la calidad del aire, el cual fue desarrollado en colaboración con el Centro de Supercómputo de Barcelona, la dinámica y química atmosférica son variables decisivas para asegurar un pronóstico más cercano a la realidad: • http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/ • La página web del SIMAT contiene los artículos científicos y tesis profesionales que se realizaron con información generada por el mismo SIMAT, el link de acceso es: • http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aaBhnmY=%27

ANEXO IV

Estadísticas básicas

Tabla A.IV.1. Estadísticas básicas para dióxido de azufre, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM			
Entidad	Estación	Clave	% de datos válidos	# trimestres con >75% de datos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 110 ppb (24 h)	2° máximo anual 200 ppb (8 h)	Promedio anual 25 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	4	72	3	0	6	2	0	1	1	3	9	23	41	3	Sí
	Benito Juárez	BJU	92	4	92	5	0	8	3	1	1	2	4	11	31	57	5	Sí
	Camarones	CAM	72	2	133	6	0	11	4	1	1	2	5	13	—	—	—	—
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	88	4	86	4	0	6	2	1	1	2	3	8	23	44	4	Sí
	Cuajimalpa	CUA	95	4	122	4	0	6	2	1	1	1	3	9	22	44	4	Sí
	Hospital General de México	HGM	89	3	111	5	0	10	3	1	1	2	4	12	35	67	5	Sí
	Iztacalco	IZT	81	2	86	4	0	8	2	0	1	2	3	10	35	—	4	—
	Merced	MER	91	4	137	6	0	10	3	1	2	3	5	12	42	65	6	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	68	2	111	5	0	9	4	1	1	2	5	14	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	67	1	57	2	0	4	1	0	1	1	2	6	—	—	—	—
	Pedregal	PED	84	3	90	4	0	6	2	1	1	2	3	8	19	—	3	—
	Santa Fe	SFE	85	3	77	3	0	6	2	0	1	1	3	8	18	39	3	Sí
	Tláhuac	TAH	64	2	42	2	0	3	1	0	1	1	2	5	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	4	96	4	0	7	2	1	1	2	3	7	29	53	4	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	89	4	76	3	0	5	1	0	1	1	2	6	25	36	3	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	69	1	74	2	0	3	1	0	1	1	2	3	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	87	3	203	7	0	12	5	1	1	2	6	17	65	80	7	Sí
	Chalco	CHO	68	1	24	1	0	2	1	0	1	1	2	3	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	90	4	354	6	0	14	4	1	1	2	5	15	64	125	6	Sí
	FES Acatlán	FAC	79	2	156	6	0	10	4	1	1	2	5	14	27	—	6	—
	Investigaciones Nucleares	INN	84	3	73	2	0	3	1	0	1	1	2	3	13	26	2	Sí
	La Presa	LPR	89	4	104	4	0	6	2	1	1	2	3	8	21	44	4	Sí
	Los Laureles	LLA	90	4	172	5	0	11	3	0	1	2	4	10	43	75	5	Sí
	Montecillo	MON	85	3	97	2	0	3	0	0	1	1	1	3	12	18	2	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	3	111	3	0	7	1	1	1	1	2	6	28	58	3	Sí
	San Agustín	SAG	89	4	137	5	0	10	3	1	1	2	4	9	37	78	5	Sí
	Tlalnepantla	TLA	89	3	187	8	0	14	6	1	2	3	8	20	60	92	8	Sí
	Tultitlán	TLI	90	3	307	8	0	17	6	1	1	3	7	20	70	117	8	Sí
	Villa de las Flores	VIF	85	3	188	6	0	14	3	1	1	2	4	14	72	102	6	Sí
	Xalostoc	XAL	87	4	84	4	0	6	3	1	1	2	4	9	25	49	4	Sí

Tabla A.IV.2. Estadísticas básicas para dióxido de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Número de horas >210 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	91	70	18	1	9	12	7	11	16	23	30	0	Sí
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	80	130	32	6	14	17	16	22	29	39	49	0	Sí
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	83	93	24	4	11	13	12	16	22	29	38	0	Sí
	Cuajimalpa	CUA	88	131	23	2	12	15	10	14	20	29	38	0	Sí
	Hospital General de México	HGM	89	105	31	4	14	19	15	20	29	39	50	0	Sí
	Iztacalco	IZT	68	107	30	4	14	16	15	21	28	37	47	0	—
	Merced	MER	94	114	34	5	14	18	18	24	32	42	53	0	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	91	128	29	4	14	17	15	20	27	37	47	0	Sí
	Pedregal	PED	87	92	23	2	12	15	10	14	21	29	38	0	Sí
	Santa Fe	SFE	51	94	23	2	12	15	10	14	21	29	38	0	—
	Tláhuac	TAH	24	66	22	3	11	14	8	14	21	28	37	0	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	110	27	2	14	18	11	17	26	35	45	0	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	89	94	22	2	11	15	9	13	20	28	36	0	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	74	64	16	1	9	12	6	9	15	21	27	0	—
	Atizapán	ATI	78	111	21	2	11	13	9	13	18	26	35	0	Sí
	Chalco	CHO	54	73	21	2	9	12	10	14	20	26	32	0	—
	Cuautitlán	CUT	89	86	19	1	11	16	7	10	17	26	34	0	Sí
	FES Acatlán	FAC	88	128	25	2	14	16	11	16	22	32	42	0	Sí
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	77	100	24	2	13	19	9	13	22	32	41	0	Sí
	Montecillo	MON	83	63	16	1	10	14	5	8	15	22	30	0	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	116	24	2	12	17	10	15	23	32	41	0	Sí
	San Agustín	SAG	88	103	23	2	12	16	10	14	21	30	39	0	Sí
	Tlalnepantla	TLA	82	141	32	5	14	17	16	22	29	39	50	0	Sí
	Tultitlán	TLI	90	106	26	5	14	19	10	15	24	34	44	0	Sí
	Villa de las Flores	VIF	83	105	19	2	12	17	6	9	17	26	36	0	Sí
	Xalostoc	XAL	88	112	30	3	14	18	14	20	29	38	48	0	Sí

Tabla A.IV.3. Estadísticas básicas para monóxido de carbono, las unidades de concentración son ppm, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 11.0 ppm (8 h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	91	1.3	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0	Sí
	Benito Juárez	BJU	96	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.9	Sí
	Camarones	CAM	81	3.3	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.8	Sí
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	83	2.2	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.3	Sí
	Cuajimalpa	CUA	96	2.7	0.3	0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.9	Sí
	Hospital General de México	HGM	89	3.7	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.1	Sí
	Iztacalco	IZT	72	3.4	0.5	0	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	2.3	—
	Merced	MER	91	3.8	0.5	0	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	2.2	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	92	3.7	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.9	Sí
	Milpa Alta	MPA	57	0.9	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	—
	Pedregal	PED	86	1.9	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.3	Sí
	Santa Fe	SFE	80	1.5	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.1	Sí
	Tláhuac	TAH	66	3.2	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.1	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	84	4.5	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.9	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	89	2.3	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.9	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	74	2.8	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.9	—
	Atizapán	ATI	86	3	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.5	Sí
	Chalco	CHO	70	3	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.7	—
	FES Acatlán	FAC	82	3.9	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	2.0	Sí
	Investigaciones Nucleares	INN	86	1.2	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.9	Sí
	La Presa	LPR	87	3.8	0.7	0	0.5	0.6	0.2	0.3	0.5	0.9	1.3	2.7	Sí
	Los Laureles	LLA	91	3.5	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.3	Sí
	Montecillo	MON	86	3.1	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.8	1.8	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	90	4.8	0.6	0	0.5	0.4	0.1	0.3	0.4	0.7	1.1	3.2	Sí
	San Agustín	SAG	86	3.2	0.5	0	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	2.0	Sí
	Tlalnepantla	TLA	84	3.1	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	2.0	Sí
	Tultitlán	TLI	91	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	2.4	Sí
	Villa de las Flores	VIF	83	3.5	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	2.5	Sí
	Xalostoc	XAL	88	5.4	0.6	0	0.6	0.5	0.1	0.3	0.4	0.8	1.4	3.0	Sí

Tabla A.IV.4. Estadísticas básicas para ozono, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Número de horas >95 ppb (1 h)	Máximo anual 70 ppb (8 h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco	AJU	59	134	31	0	24	32	5	13	25	45	66	75	98	—
	Ajusco Medio	AJM	84	151	37	0	23	30	12	20	32	50	71	141	118	No
	Benito Juárez	BJU	96	156	31	0	30	42	2	7	22	49	78	298	111	No
	Camarones	CAM	80	142	27	0	28	38	1	5	17	43	72	169	112	No
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	82	150	32	0	30	42	2	7	22	49	80	300	116	No
	Cuajimalpa	CUA	92	115	29	0	22	27	5	13	24	40	62	48	91	No
	Gustavo A. Madero	GAM	89	151	29	0	29	43	1	4	20	47	74	199	111	No
	Hospital General de México	HGM	86	179	31	0	29	41	2	7	22	48	77	272	119	No
	Iztacalco	IZT	78	169	28	0	28	40	1	5	19	45	73	168	105	No
	Merced	MER	93	158	27	0	28	39	1	4	18	43	72	197	106	No
	Miguel Hidalgo	MGH	88	145	29	0	28	39	1	6	19	45	73	189	111	No
	Milpa Alta	MPA	74	134	43	0	23	30	18	27	39	57	76	187	112	—
	Pedregal	PED	85	163	35	0	29	40	4	12	26	52	81	346	120	No
	Santa Fe	SFE	86	143	32	0	27	36	3	11	24	47	75	237	107	No
	Tláhuac	TAH	68	121	30	0	25	35	4	10	23	45	68	72	101	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	131	25	0	23	34	1	5	17	39	60	35	100	No
	UAM Xochimilco	UAX	89	147	31	0	28	43	2	7	23	50	75	220	106	No
Estado de México	Acolman	ACO	74	116	23	0	20	31	2	6	19	37	53	8	87	—
	Atizapán	ATI	93	122	28	0	24	34	2	9	21	43	66	68	101	No
	Chalco	CHO	69	116	28	0	24	39	1	5	23	44	64	25	90	—
	Cuautitlán	CUT	91	129	28	0	25	40	1	5	22	45	66	87	96	No
	FES Acatlán	FAC	84	149	29	0	26	35	2	8	21	43	69	135	114	No
	Investigaciones Nucleares	INN	83	130	37	0	21	28	13	21	33	49	68	92	96	No
	La Presa	LPR	82	136	29	0	26	38	1	7	23	45	68	115	105	No
	Los Laureles	LLA	86	127	27	0	25	38	1	5	19	43	66	53	93	No
	Montecillo	MON	82	137	32	0	27	46	1	6	28	52	72	99	115	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	143	29	0	26	38	2	7	21	45	70	112	99	No
	San Agustín	SAG	89	129	26	0	24	34	1	6	19	40	63	39	85	No
	Tlalnepantla	TLA	84	127	24	0	24	33	1	4	16	37	62	44	96	No
	Tultitlán	TLI	83	145	28	0	26	39	2	6	20	45	68	97	117	No
	Villa de las Flores	VIF	85	141	27	0	24	36	1	7	21	43	64	46	92	No
	Xalostoc	XAL	87	124	24	0	23	35	1	4	18	39	59	28	93	No

Tabla A.IV.5. Estadísticas básicas para óxidos de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	91	119	22	2	14	17	8	12	19	29	41
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	80	498	55	6	45	40	19	26	39	66	111
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	83	295	34	4	26	24	13	18	27	42	64
	Cuajimalpa	CUA	88	310	33	2	27	23	12	17	25	40	62
	Hospital General de México	HGM	89	342	46	5	33	36	17	23	37	59	88
	Iztacalco	IZT	68	383	49	4	35	36	18	25	38	61	93
	Merced	MER	94	438	58	5	44	44	21	29	45	73	112
	Miguel Hidalgo	MGH	91	484	53	5	47	41	18	24	38	65	110
	Pedregal	PED	87	260	30	3	21	22	11	16	24	38	56
	Santa Fe	SFE	51	186	33	4	23	26	11	16	25	42	65
	Tláhuac	TAH	24	188	30	3	21	23	9	15	25	38	53
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	407	42	3	33	35	12	19	32	54	81
	UAM Xochimilco	UAX	89	217	32	3	24	26	10	15	25	41	62
Estado de México	Acolman	ACO	74	174	25	2	19	21	8	11	19	32	51
	Atizapán	ATI	78	214	31	3	26	23	11	15	23	38	64
	Chalco	CHO	54	340	41	2	37	30	12	18	28	48	88
	Cuautitlán	CUT	89	310	36	1	37	34	8	12	22	46	82
	FES Acatlán	FAC	88	381	46	2	41	36	13	20	32	56	99
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	77	386	44	2	45	38	10	16	29	54	97
	Montecillo	MON	83	380	32	1	40	28	6	9	18	37	78
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	353	38	2	31	29	12	17	28	46	74
	San Agustín	SAG	88	304	40	2	35	33	12	17	28	50	84
	Tlalnepantla	TLA	82	334	57	5	41	40	22	29	44	69	109
	Tultitlán	TLI	90	325	42	6	37	35	12	17	29	52	90
	Villa de las Flores	VIF	83	263	32	2	32	29	7	11	20	40	72
	Xalostoc	XAL	88	554	64	4	57	53	20	28	44	81	135

Tabla A.IV.6. Estadísticas básicas para óxido nítrico, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	91	77	5	0	7	5	0	1	2	6	13
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	80	432	23	0	38	23	1	3	8	26	66
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	83	248	11	0	20	10	0	1	3	11	30
	Cuajimalpa	CUA	88	249	10	0	19	8	1	2	4	10	26
	Hospital General de México	HGM	89	286	15	0	23	18	0	1	5	19	43
	Iztacalco	IZT	68	315	18	0	27	19	2	3	7	22	50
	Merced	MER	94	371	24	0	35	26	2	4	10	30	66
	Miguel Hidalgo	MGH	91	415	24	0	40	23	2	3	8	26	66
	Pedregal	PED	87	221	7	0	14	7	0	1	2	8	20
	Santa Fe	SFE	51	138	10	0	16	10	1	1	3	11	28
	Tláhuac	TAH	24	151	8	0	14	7	1	1	3	8	20
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	357	14	0	24	16	1	1	4	17	41
	UAM Xochimilco	UAX	89	167	10	0	17	10	1	1	2	11	30
Estado de México	Acolman	ACO	74	147	9	0	14	8	1	2	3	10	25
	Atizapán	ATI	78	174	11	0	19	9	1	1	3	10	31
	Chalco	CHO	54	307	20	0	33	18	1	3	7	21	61
	Cuautitlán	CUT	89	273	17	0	31	17	1	1	3	18	51
	FES Acatlán	FAC	88	329	21	0	34	18	1	3	7	21	58
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	77	345	20	0	37	18	1	2	5	20	59
	Montecillo	MON	83	348	16	0	34	12	0	1	2	13	51
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	295	13	0	24	11	1	2	4	13	37
	San Agustín	SAG	88	260	17	0	28	16	1	2	5	18	50
	Tlalnepantla	TLA	82	271	25	0	33	23	3	6	12	29	64
	Tultitlán	TLI	90	278	16	0	28	14	1	2	4	16	48
	Villa de las Flores	VIF	83	243	12	0	24	10	0	1	3	11	38
	Xalostoc	XAL	88	508	34	0	49	33	4	7	14	40	91

Tabla A.IV.7. Estadísticas básicas para las muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Merced	MER	30	Alto volumen	190	110	64	29	30	79	93	107	123	136
	Pedregal	PED	28	Alto volumen	110	74	43	18	19	50	65	72	84	95
	UAM Iztapalapa	UIZ	100	Alto volumen	162	81	20	35	50	42	54	73	104	127
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	93	Alto volumen	144	86	39	30	47	51	63	85	110	123
	Xalostoc	XAL	98	Alto volumen	324	135	49	53	74	67	97	130	170	198

Tabla A.IV.8. Estadísticas básicas para las muestras de PM_{10} colectadas utilizando el muestreador de referencia (Método FRM de la U.S. EPA), las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de muestreos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo anual 75 µg/m³ (24 h)	Promedio anual 40 µg/m³	Cumple
Ciudad de México	Lomas	LOM	98	FRM 16.67 lpm	69	36	0	14	19	20	26	36	45	56	69	37	Sí
	Merced	MER	97	FRM Alto Volumen	103	48	17	19	27	25	33	43	60	72	103	48	No
	Pedregal	PED	84	FRM 16.67 lpm	62	33	13	13	22	16	22	31	43	52	62	33	Sí
	Secretaría de Hacienda	SHA	0	FRM 16.67 lpm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	FRM Alto Volumen	95	44	12	18	24	24	31	42	56	66	95	45	No
Estado de México	La Presa	LPR	98	FRM Alto Volumen	153	49	12	25	34	22	29	45	63	81	153	50	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	98	FRM Alto Volumen	94	42	11	20	28	17	26	40	54	68	94	42	No
	Tlalnepantla	TLA	97	FRM Alto Volumen	85	50	22	17	28	29	36	48	64	76	85	50	No
	Xalostoc	XAL	92	FRM Alto Volumen	182	69	26	30	36	33	50	64	85	103	182	71	No

Tabla A.IV.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM_{10} reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de analizador continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	TEOM (30°C)	148	33	2	19	26	12	18	30	44	59
	Benito Juárez	BJU	96	TEOM (30°C)	158	40	2	21	28	17	24	36	52	68
	Camarones	CAM	69	TEOM (30°C)	229	49	2	26	32	21	30	44	62	84
	Cuajimalpa	CUA	93	BETA (35°C)	187	31	1	17	22	11	18	28	40	51
	Hospital General de México	HGM	82	TEOM (30°C)	187	41	2	22	28	17	24	36	52	71
	Iztacalco	IZT	84	BETA (35°C)	292	44	1	25	29	17	27	40	56	74
	Merced	MER	72	TEOM (30°C)	234	52	2	27	35	22	32	47	67	88
	Miguel Hidalgo	MGH	93	TEOM (30°C)	168	38	3	20	24	16	24	34	48	64
	Milpa Alta	MPA	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	75	TEOM (30°C)	176	35	2	20	25	13	21	32	46	62
	Tláhuac	TAH	49	TEOM (35°C)	354	46	1	32	37	13	23	39	60	86
	UAM Iztapalapa	UIZ	56	TEOM (30°C)	256	43	3	24	28	19	27	39	55	73
Estado de México	Acolman	ACO	75	BETA (35°C)	299	43	1	28	33	13	23	37	56	79
	Atizapán	ATI	94	TEOM (35°C)	231	40	1	26	31	13	22	35	53	75
	Chalco	CHO	58	TEOM (35°C)	328	49	1	34	41	13	24	42	65	93
	Cuautitlán	CUT	87	TEOM (35°C)	373	46	1	36	37	13	22	38	59	91
	FES Acatlán	FAC	78	TEOM (35°C)	311	35	1	24	29	10	17	30	46	67
	Investigaciones Nucleares	INN	48	TEOM (30°C)	148	25	2	16	20	8	14	22	34	46
	San Agustín	SAG	69	TEOM (30°C)	385	56	3	33	38	22	33	49	71	99
	Tlalnepantla	TLA	83	TEOM (30°C)	203	49	1	26	33	21	30	45	63	84
	Tultitlán	TLI	5	TEOM (35°C)	277	82	1	49	71	27	43	72	114	152
	Villa de las Flores	VIF	84	TEOM (35°C)	414	50	1	40	43	13	23	40	66	101
	Xalostoc	XAL	81	TEOM (30°C)	378	74	2	45	49	29	43	63	92	133

Tabla A.IV.10. Estadísticas básicas para las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas utilizando el muestreador de referencia (Método FRM de la U.S. EPA), las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de muestreos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo anual 45 µg/m³ (24 h)	Promedio anual 12 µg/m³	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	97	FRM 16.67 lpm	56	23	9	10	12	11	16	23	28	38	56	23.2	No
	Pedregal	PED	89	FRM 16.67 lpm	44	19	7	8	10	10	12	18	22	30	44	18.8	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	93	FRM 16.67 lpm	58	20	6	10	13	10	13	20	26	32	58	20.4	No
Estado de México	San Agustín	SAG	89	FRM 16.67 lpm	43	20	5	8	13	10	13	19	26	32	43	20.2	No
	Tlalnepantla	TLA	95	FRM 16.67 lpm	46	24	10	9	10	14	18	24	28	37	46	24.3	No
	Xalostoc	XAL	98	FRM 16.67 lpm	70	28	8	12	16	13	19	26	35	44	70	27.7	No

Tabla A.IV.11. Estadísticas básicas de la concentración horaria de $PM_{2.5}$ reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	28	BETA (35°C)	146	21	1	13	17	7	12	19	29	37
	Ajusco Medio	AJM	92	TEOM (30°C)	106	19	1	12	14	6	11	17	25	34
	Benito Juárez	BJU	96	TEOM (30°C)	114	23	1	13	17	8	13	21	30	41
	Camarones	CAM	69	TEOM (30°C)	188	25	1	15	17	9	15	23	32	43
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	BETA (35°C)	130	21	1	12	14	8	13	19	27	35
	Gustavo A. Madero	GAM	93	TEOM-FDMS (30°C)	197	25	1	16	19	8	14	22	33	46
	Hospital General de México	HGM	82	TEOM (30°C)	152	23	1	15	18	8	13	20	31	42
	Merced	MER	72	TEOM (30°C)	165	26	1	16	19	9	15	23	34	46
	Miguel Hidalgo	MGH	93	TEOM (30°C)	149	23	1	14	16	9	13	20	29	40
	Milpa Alta	MPA	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	75	TEOM (30°C)	120	20	1	13	15	6	11	17	26	36
	UAM Iztapalapa	UIZ	56	TEOM (30°C)	211	25	1	17	18	8	14	22	32	45
	UAM Xochimilco	UAX	86	BETA (35°C)	194	23	1	14	16	8	13	21	29	38

Tabla A.IV.11 (continuación). Estadísticas básicas de la concentración horaria de $PM_{2.5}$ reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	48	TEOM (30°C)	71	16	1	9	12	5	9	14	21	27
	Nezahualcóyotl	NEZ	96	BETA (35°C)	231	24	1	17	18	7	13	21	31	43
	San Agustín	SAG	69	TEOM (30°C)	186	25	1	15	18	9	15	23	33	43
	Tlalnepantla	TLA	83	TEOM (30°C)	106	25	1	14	17	9	15	23	32	44
	Xalostoc	XAL	81	TEOM (30°C)	212	29	1	19	22	10	16	25	38	53

Tabla A.IV.12. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PMcoarse reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de analizador continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	TEOM (30°C)	113	14	1	10	13	3	6	12	19	27
	Benito Juárez	BJU	96	TEOM (30°C)	108	17	1	11	13	5	9	15	22	31
	Camarones	CAM	69	TEOM (30°C)	139	24	1	14	17	9	14	21	31	43
	Hospital General de México	HGM	82	TEOM (30°C)	144	17	1	11	14	5	9	15	23	32
	Merced	MER	72	TEOM (30°C)	134	26	1	15	19	9	15	23	34	46
	Miguel Hidalgo	MGH	93	TEOM (30°C)	101	15	1	9	11	5	8	13	19	27
	Milpa Alta	MPA	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	75	TEOM (30°C)	81	16	1	10	13	5	8	14	21	29
	UAM Iztapalapa	UIZ	56	TEOM (30°C)	87	19	1	12	15	6	10	16	25	34
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	48	TEOM (30°C)	94	10	1	9	10	2	3	7	13	21
	San Agustín	SAG	69	TEOM (30°C)	277	31	1	23	24	9	15	25	39	59
	Tlalnepantla	TLA	83	TEOM (30°C)	136	24	1	15	19	8	13	22	32	45
	Xalostoc	XAL	81	TEOM (30°C)	253	44	1	31	32	14	24	36	56	83

Tabla A.IV.13. Estadísticas básicas para la concentración de plomo presente en muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son µg/m^3 calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de trimestres válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLI MIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio trimestral 1.5 µg/m^3	Cumple
2015																
Ciudad de México	Merced	MER	90	4	0.079	0.027	0.007	0.015	0.014	0.012	0.017	0.023	0.031	0.049	0.033	Sí
	Pedregal	PED	88	4	0.049	0.013	0.003	0.010	0.007	0.005	0.007	0.009	0.014	0.029	0.019	Sí
	UAM Iztapa-lapa	UIZ	93	4	0.090	0.023	0.006	0.015	0.017	0.008	0.013	0.018	0.031	0.043	0.031	Sí
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	93	4	0.231	0.036	0.004	0.035	0.022	0.014	0.017	0.025	0.039	0.062	0.054	Sí
	Xalostoc	XAL	93	4	0.125	0.031	0.007	0.020	0.020	0.010	0.019	0.027	0.039	0.057	0.039	Sí
2016																
Ciudad de México	Merced	MER	80	2	0.111	0.021	0.005	0.018	0.014	0.008	0.010	0.015	0.025	0.042	—	—
	Pedregal	PED	80	3	0.106	0.011	0.001	0.018	0.007	0.002	0.004	0.007	0.011	0.020	0.023	Sí
	UAM Iztapa-lapa	UIZ	89	3	0.102	0.017	0.003	0.017	0.011	0.005	0.007	0.012	0.018	0.035	0.026	Sí
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	92	4	0.122	0.022	0.003	0.017	0.013	0.009	0.013	0.018	0.025	0.034	0.033	Sí
	Xalostoc	XAL	89	4	0.178	0.026	0.005	0.026	0.019	0.009	0.013	0.022	0.031	0.043	0.045	Sí
2017																
Ciudad de México	Merced	MER	67	2	0.134	0.021	0.006	0.020	0.008	0.010	0.013	0.018	0.021	0.032	—	—
	Pedregal	PED	77	3	0.041	0.009	0.002	0.008	0.006	0.003	0.005	0.006	0.010	0.018	0.013	Sí
	UAM Iztapa-lapa	UIZ	75	3	0.119	0.009	0.0004	0.018	0.008	0.006	0.008	0.013	0.016	0.023	0.026	Sí
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	80	3	0.049	0.018	0.009	0.007	0.008	0.011	0.013	0.016	0.021	0.023	0.020	Sí
	Xalostoc	XAL	77	3	0.133	0.013	0.005	0.022	0.021	0.009	0.014	0.021	0.034	0.044	0.038	Sí

Tabla A.IV.14. Estadísticas básicas para temperatura ambiente, todas las unidades están en °C.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	68	23.4	10.5	-6.2	5.2	6.7	3.1	7.6	10.7	14.3	16.9
	Ajusco Medio	AJM	96	27.9	15.8	1.1	3.6	4.8	11.9	13.5	15.4	18.3	20.8
	Benito Juárez	BJU	82	31.2	17.6	2.8	4.3	5.8	12.7	14.9	17.1	20.7	23.5
	Cuajimalpa	CUA	98	27.5	14.1	-4.1	3.7	5.0	10.1	11.6	13.5	16.6	19.4
	Gustavo A. Madero	GAM	99	32.2	18.0	2.6	4.4	5.8	13.1	15.2	17.4	21.0	24.1
	Hospital General de México	HGM	87	31.2	17.8	3.1	4.2	5.5	13.2	15.1	17.2	20.6	23.6
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	98	32.6	16.6	1.6	4.6	6.1	11.1	13.7	16.0	19.8	22.9
	Merced	MER	99	31.6	17.5	2.0	4.3	5.7	12.6	14.8	16.9	20.5	23.3
	Miguel Hidalgo	MGH	100	31.5	17.5	2.4	4.2	5.7	12.9	14.8	16.8	20.5	23.4
	Milpa Alta	MPA	73	29.0	14.2	-1.2	4.1	5.3	9.2	11.6	13.8	16.9	19.6
	Pedregal	PED	96	31.1	16.9	2.7	4.2	5.8	12.0	14.1	16.3	19.9	22.8
	Santa Fe	SFE	85	28.0	14.7	0.6	3.9	5.3	10.3	12.1	14.1	17.4	20.2
	Tláhuac	TAH	76	31.8	15.9	1.5	4.7	6.2	10.2	13.0	15.5	19.2	22.2
	UAM Iztapalapa	UIZ	64	28.6	17.2	1.4	4.2	5.2	11.7	14.9	17.0	20.1	22.9
	UAM Xochimilco	UAX	100	32.1	17.9	2.7	4.6	6.3	12.2	14.9	17.4	21.2	24.1
Estado de México	Acolman	ACO	84	31	15.9	-2.1	5.2	6.7	9.3	12.9	15.7	19.6	22.7
	Chalco	CHO	87	32.4	15.9	-1.6	5.1	6.9	9.5	12.8	15.6	19.7	22.7
	Cuautitlán	CUT	65	28.5	14.4	-3.0	6.0	8.4	6.1	10.5	14.6	18.9	22.4
	FES Acatlán	FAC	61	31.1	15.9	-1.8	6.3	9.3	7.7	11.6	15.3	20.9	24.8
	Investigaciones Nucleares	INN	4	16.6	6.0	-3.7	5.4	10.2	-0.7	1.1	5.2	11.2	13.4
	Montecillo	MON	97	32.8	16.6	-2.4	5.5	7.4	9.8	13.3	16.3	20.7	23.8
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	30.6	16.0	-0.3	4.3	5.7	11.1	13.4	15.5	19.1	21.9
	San Agustín	SAG	78	32.4	18.4	3.0	4.5	5.9	13.3	15.6	17.9	21.5	24.7
	Tlalnepantla	TLA	92	30.8	16.9	1.5	4.4	5.9	11.7	14.1	16.2	20.0	23.0
	Villa de las Flores	VIF	86	32.2	17.0	-0.1	4.9	6.3	11.1	14.1	16.5	20.4	23.7
	Xalostoc	XAL	97	30.1	17.2	1.5	4.1	5.4	12.5	14.6	16.7	20.0	22.8

Tabla A.IV.15. Estadísticas básicas para humedad relativa, todas las unidades están en %.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	75	100	73	7	21	32	39	59	80	91	95
	Ajusco Medio	AJM	99	92	55	4	19	31	28	40	56	71	80
	Benito Juárez	BJU	96	93	54	3	20	33	26	38	56	71	80
	Cuajimalpa	CUA	96	93	59	5	20	33	30	44	61	77	85
	Gustavo A. Madero	GAM	99	99	59	7	21	33	30	43	61	76	85
	Hospital General de México	HGM	87	87	51	5	19	31	24	36	52	67	75
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	95	100	59	5	23	39	27	40	61	79	89
	Merced	MER	99	94	56	3	20	32	27	40	58	72	80
	Miguel Hidalgo	MGH	100	89	51	1	20	34	22	35	52	69	77
	Milpa Alta	MPA	73	92	60	7	18	27	35	48	63	75	82
	Pedregal	PED	96	94	56	4	20	33	28	40	57	73	82
	Santa Fe	SFE	41	92	52	6	21	34	24	35	52	69	80
	Tláhuac	TAH	75	88	56	2	18	29	30	42	58	71	79
	UAM Iztapalapa	UIZ	16	91	50	7	18	30	26	35	51	65	75
	UAM Xochimilco	UAX	100	92	57	4	20	32	28	41	59	73	81
Estado de México	Acolman	ACO	85	96	61	3	21	34	29	46	65	80	87
	Chalco	CHO	87	92	59	3	20	31	31	44	60	75	83
	Cuautitlán	CUT	76	97	67	5	24	40	30	48	72	88	94
	FES Acatlán	FAC	61	94	57	2	24	41	24	37	60	78	87
	Investigaciones Nucleares	INN	84	95	70	9	21	32	37	56	75	88	91
	Montecillo	MON	97	94	60	2	21	35	29	44	63	79	87
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	93	55	4	19	31	28	40	57	71	79
	San Agustín	SAG	70	100	44	3	20	32	16	29	45	61	70
	Tlalnepantla	TLA	92	87	52	6	19	33	24	36	54	69	76
	Villa de las Flores	VIF	86	100	60	5	23	38	27	42	62	80	88
	Xalostoc	XAL	97	87	51	5	19	30	24	36	52	66	74

Tabla A.IV.16. Estadísticas básicas para velocidad de viento, todas las unidades están en m/s.

				ESTADÍSTICAS BÁSICAS											
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Porcentaje de calmas	Dirección del viento dominante*
Ciudad de México	Ajusco	AJU	79	9.1	2.5	0	1.1	1.3	1.2	1.7	2.4	3	4	0.2	SSO
	Ajusco Medio	AJM	99	12.5	2.7	0	1.5	1.8	1.1	1.6	2.5	3.4	4.6	0.4	ONO
	Benito Juárez	BJU	98	6	1.8	0	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	99	7.4	2	0	0.9	1.2	0.9	1.3	1.8	2.5	3.1	0.1	NNO
	Gustavo A. Madero	GAM	99	7.5	1.9	0	1.2	1.5	0.5	1	1.6	2.5	3.7	3.8	NE
	Hospital General de México	HGM	87	7	1.7	0	1	1.3	0.6	0.9	1.4	2.2	3.1	1.1	NNO
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	99	5.6	1.8	0	0.9	1.2	0.7	1.1	1.6	2.3	3.1	0	NNO
	Merced	MER	99	6.5	2.1	0.2	1	1.3	1	1.3	1.9	2.6	3.6	0.1	NNE
	Miguel Hidalgo	MGH	99	6.5	2	0	1	1.2	0.8	1.3	1.9	2.5	3.3	1.3	N
	Milpa Alta	MPA	73	9	2.7	0.2	1.2	1.5	1.3	1.8	2.5	3.3	4.3	0	SSO
	Pedregal	PED	96	6.6	1.9	0	0.9	0.9	0.9	1.3	1.7	2.2	3	0.1	ONO
	Santa Fe	SFE	61	7.2	2.2	0.2	0.9	1	1.3	1.6	2.1	2.6	3.4	0	O
	Tláhuac	TAH	76	7.2	1.9	0.3	1	1.4	0.8	1.1	1.7	2.5	3.4	0	O
	UAM Iztapalapa	UIZ	66	7.5	2	0	1.1	1.3	0.8	1.2	1.7	2.5	3.5	0.9	NE
	UAM Xochimilco	UAX	94	7.1	1.9	0.3	1	1.2	0.9	1.2	1.7	2.4	3.4	0	ESE
Estado de México	Acolman	ACO	85	9.4	2.3	0.3	1.3	1.6	1.1	1.3	1.9	2.9	4.2	0	N
	Chalco	CHO	87	6.9	1.7	0	1.1	1.7	0.6	0.8	1.3	2.5	3.4	0.5	ESE
	Cuautitlán	CUT	63	5.1	1.5	0.1	0.9	1.4	0.5	0.7	1.4	2.1	2.7	0.6	N
	FES Acatlán	FAC	94	5.8	1.7	0.1	0.9	1.2	0.7	1	1.6	2.2	2.9	0.1	NO
	Investigaciones Nucleares	INN	83	6.3	1.6	0	0.9	1.3	0.7	0.8	1.3	2.1	2.8	0.3	SE
	Montecillo	MON	81	8.8	2.1	0	1.5	2	0.5	1	1.7	3	4.5	2.7	E
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	8.9	2.5	0.1	1.4	1.6	1.1	1.5	2.1	3.1	4.5	0.2	ENE
	San Agustín	SAG	92	5.4	1.4	0	0.8	1.1	0.5	0.8	1.3	1.9	2.5	2.4	NE
	Tlalnepantla	TLA	93	6.4	1.9	0	1.1	1.5	0.7	1.1	1.7	2.6	3.4	0.9	NO
	Villa de las Flores	VIF	98	8.1	1.9	0	1.1	1.2	0.8	1.1	1.6	2.3	3.4	0.1	NNO
	Xalostoc	XAL	97	11.9	2.5	0	1.9	2.2	0.7	1.1	1.8	3.3	5.4	1.3	NE

*La dirección predominante corresponde al vector resultante de la suma vectorial de los datos horarios, de donde viene.

Tabla A.IV.17. Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta A, todas las unidades están en W/m².

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango inter-cuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	94	5.973	1.056	0	1.523	1.897	0	0	0.043	1.897	3.663
	Merced	MER	68	6.067	1.097	0	1.573	1.952	0	0	0.054	1.952	3.836
	Milpa Alta	MPA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	89	6.124	1.061	0	1.542	1.901	0	0	0.044	1.901	3.702
	Santa Fe	SFE	86	6.155	1.093	0	1.586	1.97	0	0	0.037	1.97	3.783
Estado de México	Chalco	CHO	46	6.012	1.156	0	1.632	2.232	0	0	0.01	2.232	3.937
	Cuautitlán	CUT	39	6.227	1.135	0	1.667	2.062	0	0	0.019	2.062	3.983
	FES Acatlán	FAC	84	6.195	1.06	0	1.537	1.931	0	0	0.036	1.931	3.678
	Montecillo	MON	87	6.275	1.176	0	1.665	2.229	0	0	0.044	2.229	4.025
	San Agustín	SAG	88	6.019	1.124	0	1.618	2.051	0	0	0.039	2.051	3.901
	Tlalnepantla	TLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.18. Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta B, todas las unidades están en W/m².

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango in-tercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	94	0.316	0.042	0	0.068	0.065	0	0	0	0.065	0.162
	Merced	MER	67	0.324	0.048	0	0.078	0.071	0	0	0.001	0.071	0.188
	Milpa Alta	MPA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	89	0.346	0.047	0	0.077	0.067	0	0	0	0.067	0.182
	Santa Fe	SFE	86	0.361	0.048	0	0.08	0.067	0	0	0	0.067	0.186
Estado de México	Chalco	CHO	47	0.307	0.045	0	0.073	0.073	0	0	0	0.073	0.169
	Cuautitlán	CUT	39	0.330	0.05	0	0.081	0.077	0	0	0	0.077	0.19
	FES Acatlán	FAC	84	0.375	0.045	0	0.074	0.068	0	0	0	0.068	0.171
	Montecillo	MON	87	0.364	0.051	0	0.082	0.080	0	0	0	0.08	0.198
	San Agustín	SAG	88	0.335	0.048	0	0.077	0.072	0	0	0	0.072	0.182
	Tlalnepantla	TLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.19. Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo.

			PP	pH			ANIONES			CATIONES					
Entidad	Estación	Clave	Precipitación pluvial total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje de eventos de lluvia ácida (%)	NO_3^- depósito total (kg/ha)	SO_4^{2-} depósito total (kg/ha)	Cl^- depósito Total (kg/ha)	NH_4^+ depósito Total (kg/ha)	Ca^{2+} depósito Total (kg/ha)	K^+ depósito Total (kg/ha)	H^+ depósito Total (kg/ha)	Mg^{2+} depósito Total (kg/ha)	Na^+ depósito Total (kg/ha)
Ciudad de México	Ajusco	AJU	1063	4.1	5.1	41	21.34	22.81	3.12	12.27	5.01	0.56	0.09	0.28	0.79
	Cerro del Tepeyac	TEC	844	4.6	5.6	14	22.54	22.38	1.91	14.82	7.39	0.66	0.02	0.30	0.98
	Corena	COR	579	4.9	5.8	19	17.86	17.46	2.13	11.61	4.84	0.54	0.01	0.23	0.81
	Diconsa	DIC	1212	5.5	6.1	19	31.51	32.87	2.77	20.15	11.09	1.27	0.01	0.46	1.68
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	1085	4.4	5.2	36	27.27	29.42	3.06	15.24	8.63	0.88	0.06	0.44	1.13
	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	1368	4.2	5.2	32	30.71	27.70	3.11	15.64	9.49	0.93	0.08	0.52	1.11
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	845	4.5	5.7	15	24.95	23.03	1.67	16.08	8.05	0.67	0.02	0.36	0.89
	Legaria	IBM	1187	4.6	5.6	18	31.98	34.13	2.43	20.69	11.13	1.10	0.03	0.49	1.47
	Lomas	LOM	1233	4.9	5.8	15	32.27	33.46	2.39	19.68	11.40	0.77	0.02	0.41	1.27
	Milpa Alta	MPA	814	3.9	5.0	48	17.64	21.82	3.01	10.98	4.07	0.41	0.09	0.28	0.77
	Museo de la Ciudad de México	MCM	981	4.7	6.0	8	29.75	29.13	2.16	18.86	10.24	1.49	0.01	0.48	1.25
	San Nicolás Totolapan	SNT	1165	4.5	5.5	26	29.04	27.79	2.48	16.40	8.14	1.38	0.04	0.50	1.17
Estado de México	Montecillo	MON	656	4.7	5.4	18	16.54	16.89	1.50	10.97	4.82	0.66	0.02	0.36	0.92
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	757	4.1	5.6	12	19.65	21.75	2.15	14.14	5.65	0.69	0.02	0.25	1.00
	Tlalnepantla	TLA	955	5.1	5.7	10	26.21	32.06	1.79	16.81	10.12	0.76	0.02	0.33	0.92
	Xalostoc	XAL	630	5.2	6.2	7	20.37	20.16	1.71	12.90	8.33	0.73	0.00	0.40	1.29

Tabla A.IV.20. Conteo de días con calidad del aire favorable. Se considera un día como bueno cuando la concentración del contaminante es menor o igual a 100 puntos en el índice de calidad del aire.

			OZONO			PM_{10}			$PM_{2.5}$			Total	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	% días malos	% días buenos
Ciudad de México	Ajusco	AJU	62	11	51	—	—	—	30	1	29	11	61
	Ajusco Medio	AJM	88	17	71	93	5	88	94	1	93	19	77
	Benito Juárez	BJU	100	32	68	99	13	86	99	1	98	35	64
	Camarones	CAM	84	21	63	73	25	48	73	3	70	27	59
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	85	32	53	—	—	—	80	1	79	34	60
	Cuajimalpa	CUA	96	8	88	98	4	94	—	—	—	9	90
	Gustavo A. Madero	GAM	93	23	70	—	—	—	95	2	93	28	72
	Hospital General de México	HGM	90	28	62	85	15	70	86	1	85	32	61
	Iztacalco	IZT	82	21	61	85	20	65	—	—	—	28	58
	Merced	MER	98	24	74	75	28	47	75	2	73	33	66
	Miguel Hidalgo	MGH	91	22	69	95	10	85	95	1	94	27	69
	Milpa Alta	MPA	79	18	61	—	—	—	—	—	—	18	61
	Pedregal	PED	90	36	54	—	—	—	—	—	—	36	54
	Santa Fe	SFE	90	29	61	81	7	74	80	0	80	30	64
	Tláhuac	TAH	72	9	63	54	24	30	—	—	—	15	57
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	5	90	62	13	49	62	2	60	8	88
	UAM Xochimilco	UAX	93	26	67	—	—	—	92	2	90	29	67
Estado de México	Acolman	ACO	77	1	76	77	23	54	—	—	—	12	65
	Atizapán	ATI	97	9	88	98	35	63	—	—	—	12	88
	Chalco	CHO	74	4	70	63	31	32	—	—	—	14	59
	Cuautitlán	CUT	96	11	85	94	55	39	—	—	—	21	75
	FES Acatlán	FAC	89	17	72	84	21	63	—	—	—	17	76
	Investigaciones Nucleares	INN	88	13	75	50	1	49	51	0	51	13	77
	La Presa	LPR	86	14	72	—	—	—	—	—	—	14	72
	Los Laureles	LLA	90	6	84	—	—	—	—	—	—	6	84
	Montecillo	MON	87	13	74	—	—	—	—	—	—	13	74
	Nezahualcóyotl	NEZ	92	14	78	—	—	—	98	5	93	23	76
	San Agustín	SAG	93	6	87	73	36	37	73	1	72	24	74
	Tlalnepantla	TLA	90	6	84	88	36	52	87	1	86	16	79
	Tultitlán	TLI	86	11	75	5	5	0	—	—	—	16	71
	Villa de las Flores	VIF	90	6	84	92	50	42	—	—	—	25	69
	Xalostoc	XAL	91	3	88	84	62	22	84	4	80	50	45
Total	Ciudad de México *		100	55	45	100	20	80	100	9	91	39	61
	Estado de México *		100	42	58	100	51	49	100	15	85	37	63
	Zona metropolitana *		100	60	40	100	51	49	100	16	84	24	76

* Considerando todas las estaciones de monitoreo.

ANEXO V

Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Tabla A.V.1. Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México y su área conurbada entre 2001 y 2016 (fase, derogada en 2016).

		Activación			Desactivación	
Año	**Contaminante**	**Fecha y hora**	**Estación**	**Valor Índice**	**Fecha y hora**	**Duración**
2001	Ozono	13-ene 15:00	TPN	209	13-ene 18:00	3 h
	Ozono	17-ene 15:00	AZC	220	17-ene 19:00	4 h
	Ozono	29-ene 15:00	AZC	231	29-ene 18:00	3 h
	Ozono	13-feb 16:00	AZC	208	13-feb 18:00	2 h
	Ozono	07-mar 14:00	CUA	201	07-mar 17:00	3 h
	Ozono	02-may 14:00	BJU	219	02-may 16:00	2 h
	Ozono	02-may 14:00	PLA	214	02-may 16:00	2 h
	Ozono	24-may 15:00	BJU	205	24-may 17:00	2 h
	Ozono	28-may 16:00	CUA	213	28-may 18:00	2 h
	Ozono	07-jun 15:00	TAC	209	07-jun 16:00	1 h
	Ozono	07-jun 16:00	PLA	213	07-jun 18:00	2 h
	Ozono	21-jul 15:00	CUA	206	21-jul 18:00	3 h
	Ozono	04-ago 15:00	SUR	203	04-ago 17:00	2 h
	Ozono	18-ago 15:00	SUR	209	18-ago 17:00	2 h
2002	Ozono	16-ene 15:00	PED	219	16-ene 18:00	3 h
	Ozono	15-feb 16:00	PED	209	15-feb 18:00	2 h
	Ozono	15-mar 17:00	TAC	204	15-mar 18:00	1 h
	Ozono	02-abr 14:00	PLA	208	02-abr 16:00	2 h
	Ozono	20-abr 16:00	PLA	207	20-abr 18:00	2 h
	Ozono	22-abr 15:00	AZC	202	22-abr 17:00	2 h
	Ozono	22-abr 16:00	PED	210	22-abr 17:00	1 h
	Ozono	18-sep 15:00	PED	232	18-sep 18:00	Se activó la Fase I
	Ozono	23-oct 15:00	PED	202	23-oct 17:00	2 h
	Ozono	21-dic 17:00	EAC	212	21-dic 18:00	1 h
2003	PM10	01-ene 11:00	XAL	161	01-ene 00:00	13 h
	Ozono	03-abr 15:00	AZC	209	03-abr 15:00	59 min
	Ozono	10-may 15:00	SUR	204	10-may 15:00	59 min
	PM10	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó la Fase I
2004	—	—	—	—	—	—
2005	—	—	—	—	—	—
2006	PM10	01-ene 09:00	VIF	169	02-ene 03:00	18 h
	PM10	16-mar 19:00	SAG	167	17-mar 17:00	22 h

2007	Ozono	14-abr 16:00	PED	185	16-abr 16:00	48 h
	Ozono	23-jun 15:00	COY	172	24-jun 15:00	24 h
	Ozono	27-jul 16:00	TPN	184	28-jul 16:00	24 h
2008	Ozono	08-abr 16:00	EAC	172	09-abr 16:00	24 h
	Ozono	10-may 17:00	COY	172	11-may 17:00	24 h
2009	Ozono	13-feb 17:00	PED	180	16-feb 17:00	72 h
	PM10	03-nov 22:00	XAL	164	05-nov 09:00	48 h
2010	Ozono	03-may 16:00	EAC	168	05-may 16:00	48 h
	Ozono	31-may 17:00	EAC	172	02-jun 17:00	48 h
	Ozono	04-jun 17:00	UIZ	165	05-jun 17:00	24 h
2011	PM10	11-ene 21:00	XAL	156	12-ene 17:00	20 h
	Ozono	26-mar 16:00	COY	160	27-mar 16:00	24 h
	Ozono	12-may 16:00	PED	161	14-may 16:00	48 h
	Ozono	16-jun 16:00	COY	161	17-jun 16:00	24 h
	Ozono	13-nov 16:00	FAC	156	14-nov 16:00	24 h
2012	Ozono	02-mar 16:00	FAC	153	04-mar 16:00	48 h
	Ozono	11-nov 16:00	PED HGM	159 151	12-nov 15:00	23 h
	PM10	25-dic 11:00	VIF	152	26-dic 10:00	23 h
2013	PM10	01-ene 10:00	VIF	158	02-ene 10:00	24 h
	Ozono	22-abr 17:00	NEZ	164	23-abr 20:00	27 h
	Ozono	27-abr 15:00	MER	159	27-abr 20:00	29 h
	Ozono	02-may 17:00	PED	157	03-may 20:00	27 h
	Ozono	09-may 17:00	IZT	158	11-may 20:00	51 h
	Ozono	21-may 16:00	UAX	151	22-may 20:00	28 h
2014	Ozono	20-feb 17:00	FAC	159	21-feb 20:00	27 h
	Ozono	20-mar 16:00	CUA	160	21-mar 20:00	28 h
	Ozono	09-may 16:00	SUR	156	10-may 20:00	28 h
2015	Ozono	03-mar 17:00	CUA	155	04-mar 20:00	27 h
	Ozono	08-abr 17:00	SFE CUA	159 151	10-abr 19:00	50 h
	Ozono	05-may 16:00	IZT SFE SJA	157 154 1156	06-may 18:00	26 h
	Ozono	09-may 17:00	PED CCA	161 152	10-may 20:00	27 h
	Ozono	10-jun 16:00	COY TPN	152 151	12-jun 17:00	49 h
	Ozono	04-oct 16:00	FAC	170	05-oct 17:00	25 h
	PM10	25-dic 08:00	VIF	151	26-dic 12:00	28 h
2016	Ozono	19-feb 16:00	CHO MPA	157 153	20-feb 17:00	25 h
	Ozono	21-feb 15:00	GAM	155	22-feb 20:00	29 h
	Ozono	12-mar 17:00	GAM FAC	159 154	14-mar 16:00	Se activó Fase I
	Ozono	04-abr 18:00	BJU	155	05-abr 17:00	Se activó Fase I*

*A partir del 6 de abril de 2016, las autoridades Federales decidieron reducir el valor del umbral de la activación de la Fase I, dejando este límite en el valor de 155 ppb (150 puntos del Índice de Calidad del Aire) que correspondía al valor de la Precontingencia y se desapareció la Fase de Precontingencia del PCAA.

Tabla A.V.2. Activación de la Fase de Contingencia en la Ciudad de México entre 2001 y 2018.

		Activación				Desactivación	
Año	**Contaminante**	**Fecha y hora**	**Estación**	**Valor Índice**	**Fase**	**Fecha y hora**	**Duración**
2001	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18-sep 16:00	PED	242	Fase I	19-sep 16:00	24 h
2003	PM10	25-dic 12:00	XAL	176	Fase I, Regional	26-dic 12:00	24 h
2004	—	—	—	—	—	—	—
2005	PM10	01-ene 08:00	VIF	181	Fase I, Regional	02-ene 08:00	24 h
2006	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	—
2009	—	—	—	—	—	—	—
2010	—	—	—	—	—	—	—
2011	—	—	—	—	—	—	—
2012	—	—	—	—	—	—	—
2013	—	—	—	—	—	—	—
2014	—	—	—	—	—	—	—
2015	—	—	—	—	—	—	—
2016	Ozono	14-mar 16:00	CUA	194	Fase I	17-mar 16:00	72 h
	Ozono	05-abr 17:00	AJM	156	Fase I*	06-abr 17:00	24 h
	Ozono	02-may 15:00	BJU	161	Fase I*	05-may 17:00	74 h
	Ozono	14-may 17:00	TAH	157	Fase I*	15-may 15:00	22 h
	Ozono	20-may 15:00	SFE	178	Fase I*	21-may 17:00	26 h
	Ozono	24-may 15:00	CAM	151	Fase I*	24-may 21:00	06 h
	Ozono	27-may 15:00	GAM	165	Fase I*	28-may 18:00	27 h
	Ozono	31-may 16:00	MGH	155	Fase I*	01-jun 18:00	26 h
	Ozono	08-jul 17:00	SFE	152	Fase I*	09-jul 15:00	22 h
	Ozono	11-ago 16:00	AJM	151	Fase I*	12-ago 17:00	25 h
2017	PM10	06-ene 09:00	XAL	153	Fase I, Regional	07-ene 09:00	24 h
	Ozono	15-may 16:00	AJM	151	Fase I*	21-may 19:00	147 h
	Ozono	22-may 15:00	GAM	162	Fase I*	24-may 18:00	51 h
	PM10	14-dic 11:00	SAG	154	Fase I, Regional	15-dic 09:00	22 h
2018	Ozono	06-jun 16:00	PED	161	Fase I*	07-jun 16:00	24 h
	PM10	25-dic 11:00	VIF	152	Fase I, Regional	26-dic 10:00	23 h

*A partir del 5 de abril de 2016, las autoridades Federales decidieron reducir el valor del umbral de la activación de la Fase I, dejando este límite en el valor de 155 ppb (150 puntos del Índice de Calidad del Aire) que correspondía al valor de la Precontingencia y se desapareció la Fase de Precontingencia del PCAA.

ANEXO VI

Mosaicos

Partículas menores a 2.5 µm ($PM_{2.5}$)

Concentración	Color
0 - 10 µg/m³	
11 - 20 µg/m³	
21 - 30 µg/m³	
31 - 40 µg/m³	
41 - 50 µg/m³	
51 - 60 µg/m³	
61 - 70 µg/m³	
71 - 80 µg/m³	
81 - 90 µg/m³	
> 90 µg/m³	

Figura A.VI.1. Mosaico del promedio móvil de 24 h de $PM_{2.5}$, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 2004 y 2018. El color de la celda indica la concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo a los intervalos y colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM_{10})

Concentración	Color
0 - 25 µg/m³	
26 - 50 µg/m³	
51 - 75 µg/m³	
76 - 100 µg/m³	
101 - 125 µg/m³	
126 - 150 µg/m³	
151 - 175 µg/m³	
176 - 200 µg/m³	
> 200 µg/m³	

Figura A.VI.2. Mosaico del promedio móvil de 24 h de PM_{10}, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1995 y 2018. El color de la celda indica la concentración de PM_{10} de acuerdo a los intervalos y colores de la escala.

Ozono (O_3)

Concentración	Color
0 - 25 ppb	
26 - 50 ppb	
51 - 75 ppb	
76 - 100 ppb	
101 - 125 ppb	
126 - 150 ppb	
151 - 175 ppb	
176 - 200 ppb	
201 - 225 ppb	
> 225 ppb	

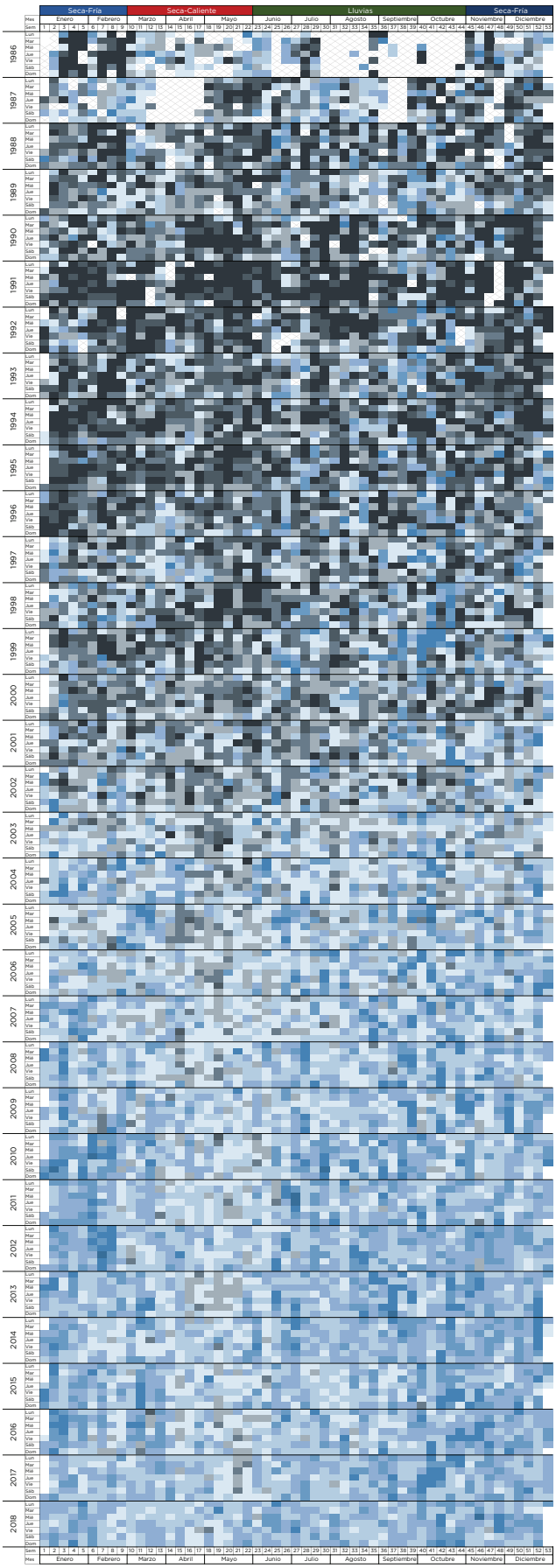


Figura A.VI.3. Mosaico del promedio horario de ozono, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1986 y 2018. El color de la celda indica la concentración del ozono de acuerdo a los intervalos y colores de la escala.