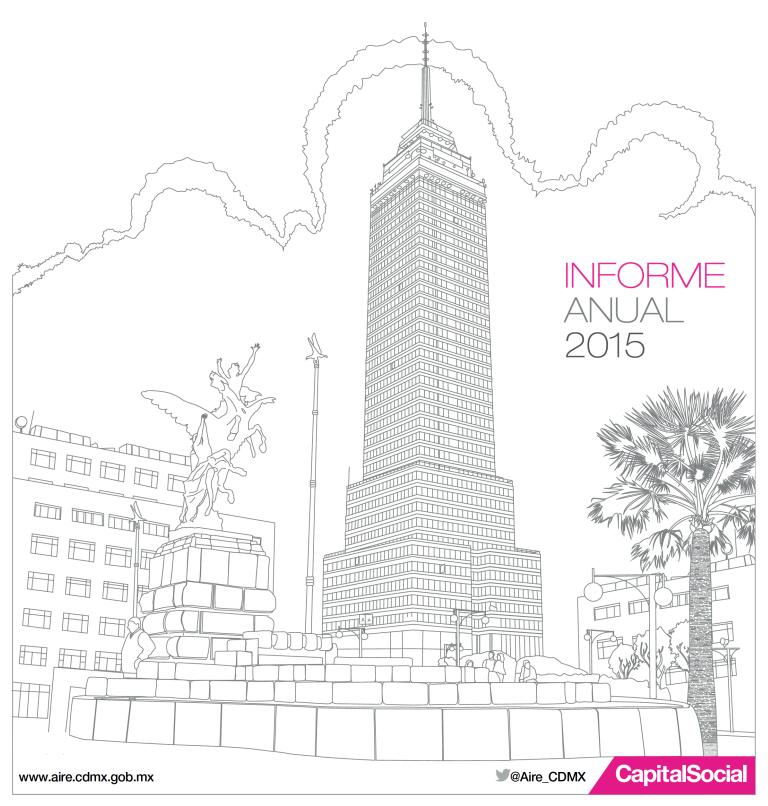
# CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO









Miguel Ángel Mancera Espinosa Jefe de Gobierno de la Ciudad de México

Tanya Müller García Secretaria del Medio Ambiente

Antonio Mediavilla Sahagún Director General de Gestión de la Calidad del Aire

Armando Retama Hernández Director de Monitoreo Atmosférico

Olivia Rivera Hernández Subdirectora de Análisis

Alfredo Alfonso Soler Subdirector de Meteorología

Miguel Sánchez Rodríguez Subdirector de Monitoreo

José Luis Del Río Jáuregui Subdirector de Sistemas

## Presentación

Como cada año, la Dirección de Monitoreo Atmosférico publica su informe anual sobre el estado de la calidad del aire que incluye información actualizada derivada de los resultados del programa de monitoreo atmosférico. Este año se caracterizó por la presencia del fenómeno climático de El Niño que provocó cambios meteorológicos a nivel global, pero también a escala local, con consecuencias importantes en los patrones de la contaminación atmosférica. Este documento evalua los cambios en las distribuciones espaciales y temporales de los principales contaminantes del aire en un contexto meteorológico y de gestión. Presenta los resultados del monitoreo de depósito atmosférico y la situación de la lluvia ácida. El informe incluye también los primeros resultados de las campañas especiales de monitoreo de hidrocarburos precursores del ozono y de carbono negro, que ha realizado la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Las campañas están orientadas a generar información que contribuya a la caracterización del problema de la contaminación atmosférica por ozono y partículas suspendidas, además de proporcionar insumos necesarios para la gestión de la calidad del aire. Esperamos que el documento sea de su interés.

La Dirección de Monitoreo Atmosférico

Redacción Armando Retama Hernández

Portada Ramón Gaona Díaz

Diseño y fotografía Armando Retama Hernández

Estadística

Mónica Jaimes Palomera, José Alberto Aguilar Juárez

Revisión

Olivia Rivera Hernández, Mónica Jaimes Palomera, José Luis Del Río Jauregui

D. R. © 2016

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

Plaza de la Constitución no. 1, 3er piso, colonia Centro, delegación 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 Atmosférico 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 del documento por parte de terceros. Las opiniones expresadas por los autores, editores o grupos de expertos no representan necesariamente el criterio ni la política de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

#### Citar este documento como:

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D. F. Julio 2016.



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 Atmosférico, quienes cada día realizan un esfuerzo importante con dedicación y compromiso.

#### Dirección de Monitoreo Atmosférico

Armando Retama Hernández, Mónica Jaimes Palomera

#### Subdirección de Análisis

Olivia Rivera Hernández, Isabel Graciela González Merino, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, Gerardo Samuel López Venegas, William Hernández Rosas, Eduardo Preciado Martínez, María Luisa Quintanar Chávez, César Calleros Aguilar, David Javier Gónzalez Bautista, José Alberto Aguilar Juárez, Angélica Ayala Avila, Xóchitl Loreto Carmona, Laura Edith Ocampo Trejo.

#### Subdirección de Meteorología

Alfredo Alonso Soler, Marco Gabriel Hernández Hernández, José Ávalos Torres.

#### Subdirección de Monitoreo

J. J. Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, Juan Manuel Campos Díaz, Angélica Neria Hernández, Julio César Argueta Rodríguez, Fernando Alonso Vega Bernal, Raymundo Juárez Hernández, Adrián Pérez Narváez, Antonio Silva Hernández, José Gabriel Elias 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, Eloy Contreras Sánchez, 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 Godinez Ángeles, Ulises Josúe López Fabian.

#### Subdirección de Sistemas

José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Ramón Gaona Díaz, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpizar, Gabriela Hernández Cruz, Ernesto Ricardo Laguna Blanco, Miguel Ángel Veloz Lucas, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdéz Espinosa, Jorge Cornejo Martínez.

#### Administración

Margarita Barrientos Contreras, Guadalupe Granados Gutiérrez, Francisco Serrano Vázquez, José Luis Cruz Fernández.

#### Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM (análisis del depósito atmosférico)

Dr. Humberto Bravo Álvarez, Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Mtra. Ana Luisa Alarcón Jiménez, María del Carmen Torres Barrera.

Agradecemos a la Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones por la información proporcionada para este documento.

# Índice

Índice	5
Resumen ejecutivo	7
1. Cumplimiento de la normatividad	10
Actualización de las Normas Oficiales Mexicanas para ozono y partículas	11
Dióxido de azufre	13
Dióxido de nitrógeno	13
Monóxido de carbono	14
Ozono	15
Partículas menores a 10 μm	15
Partículas menores a 2.5 μm	16
2. El tiempo	18
Temperatura	19
Humedad relativa	22
Precipitación pluvial	23
Presión barométrica	24
Viento	25
Altura de capa de mezclado	29
Radiación solar ultravioleta	31
Índice de radiación solar ultravioleta	32
El Niño: su impacto en el tiempo meteorológico y la calidad del aire	33
3. Calidad del aire	38
Dióxido de azufre	39
Óxidos de nitrógeno	43
Monóxido de carbono	48
Ozono	52
Partículas suspendidas	59
Índice de calidad del aire	65
Tendencias	67
4. Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas Efecto de la modificación de las normas para ozono y partículas suspendidas en	78
los niveles de activación del PCAA	80
Episodios de activación del Programa de Contingencias Ambientales	
Atmosféricas durante 2015	81

Composición iónica	105
Depósito	107
Lluvia ácida	109
6. Carbono negro	112
El carbono negro	113
Resultados del análisis de CNe en PM <sub>2.5</sub>	115
7. Hidrocarburos precursores del ozono	120
Introducción	121
Método	121
Resultados y discusión	122
Principales hallazgos	134
Referencias	135
Anexos	138
Anexo 1	139
Anexo 2	145
Anexo 3	147
Anexo 4	155
Anexo 5	172
Anexo 6	175

5. Depósito atmosférico 102

# Resumen ejecutivo

En este informe se analizan los datos de calidad del aire de la Ciudad de México y su área metropolitana durante el periodo comprendido entre enero y diciembre de 2015. La Ciudad de México y el área conurbada del Estado de México comparten la misma cuenca atmosférica por lo tanto es necesario observar el continuo urbano como una unidad, con un problema ambiental compartido en donde cada una de las entidades tiene responsabilidades y retos similares.

En términos meteorológicos el año 2015 fue un año atípico con un incremento importante en la precipitación pluvial durante el primer semestre del año y un incremento en la temperatura asociado al fenómento meteorológico cíclico de El Niño que se presentó en una fase intensa durante el segundo semestre. En noviembre y diciembre se observó un incremento en la temperatura promedio de 2.0°C y 1.6°C, respectivamente, con respecto al promedio de los 25 años previos. La presencia de lluvia atípica durante la temporada de ozono disminuyó significativamente la concentración de ozono y de aerosoles, mientras que la influencia del aumento de temperatura durante el invierno contribuyó a un ligero aumento en la intestabilidad atmosférica y una disminución en la intensidad de las inversiones térmicas, que generalmente se observan durante el invierno.

Durante 2015 se mantuvo el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas para dióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, sin embargo, las concentraciones de ozono, partículas suspendidas menores a 10  $\mu$ m (PM<sub>10</sub>) y partículas menores a 2.5  $\mu$ m (PM<sub>2.5</sub>), continuaron superando los valores de la norma. A finales de 2014 el Gobierno Federal modificó los valores límite para ozono (NOM-020-SSA1-2014) y partículas suspendidas (NOM-025-SSA1-2014). En el caso de ozono el valor límite para el promedio de 1 hora se redujo de 110 a 95 ppb. En PM<sub>10</sub> el valor límite para el promedio de 24 horas disminuyó de 125 µg/m³ a 75 μg/m³ y el promedio anual pasó de 50 μg/m³ a 40 μg/m³. Para PM<sub>2.5</sub> el promedio de 24 horas se redujo de 60 µg/m³ a 45 µg/m³ y el promedio anual de 15 µg/m³ a 12 µg/m³. Evaluando los datos con respecto a los nuevos límites de la norma, en el caso de ozono se reportaron 776 horas en las que la concentración máxima superó el valor límite para el promedio horario, mientras que el valor máximo para el promedio de 8 horas fue de 130 ppb; las concentraciones máximas del contaminante se observaron en las estaciones de monitoreo ubicadas en la Ciudad de México. El promedio anual máximo de PM<sub>10</sub> fue de 55.4 µg/m<sup>3</sup> en la estación Xalostoc, en Ecatepec, Estado de México, mientras que el valor de 24 horas máximo fue de 120 µg/m³ en la estación Merced, en la Ciudad de México. En el caso de  $PM_{25}$  el promedio anual máximo fue de 27.7 µg/m³ en Xalostoc, mientras que el valor máximo para el promedio de 24 horas fue de 57 μg/m³ en la estación Tlalnepantla, en el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. La concentración promedio anual de dióxido de azufre fue de 4.4 ppb con un valor horario máximo de 299 ppb, aún cuando la concentración máxima de dióxido de azufre no superó ninguno de los valores límite de la norma, las emisiones del corredor industrial Tula-Tepeji son la principal fuente de dióxido de azufre y sulfatos en la Ciudad de México. En el caso de dióxido de nitrógeno el promedio anual fue de 18.8 ppb con un valor horario máximo de 136 ppb. El promedio anual de la concentración de monóxido de carbono fue de 0.74 ppm, con un promedio horario máximo de 7.8 ppm.

En el segundo semestre se observó un ligero incremento en las concentraciones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, asociado a un cambio en los patrones del tránsito

vehicular posiblemente derivado de las modificaciones al programa Hoy No Circula a partir de julio de 2015. Los datos sugieren que la modificación tuvo además un impacto en la distribución del monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno por día de la semana. Hasta antes de la modificación, las concentraciones máximas se registraban en viernes, sin embargo, en 2015 se observó que el martes y miércoles registraron con mayor frecuencia las concentraciones máximas para ambos contaminantes. En el caso de ozono la presencia de lluvia durante marzo, al inicio de la temporada de ozono, favoreció una disminución en la concentración de ozono y un mayor número de días limpios. En 2015 se registraron 220 días en los que la concentración de ozono superó el valor de la norma para el promedio horario y 197 días en los que se excedió el valor para el promedio de 8 horas. Las concentraciones máximas de ozono se observaron con mayor frecuencia en martes, miércoles y domingo. La zona sur de la Ciudad de México fue la más afectada por los elevados niveles de ozono. Los promedios anuales para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  fueron de 43, 23.6 y 19.7  $\mu$ g/m³, respectivamente. En cuanto la tendencia, en todos los contaminantes se observaron variaciones mínimas con respecto a los promedios del año previo.

La Fase de Precontingencia del PCAA se activó en siete ocasiones, seis por ozono y una por PM<sub>10</sub>. En el caso de ozono, todas las activaciones estuvieron relacionadas con episodios de estabilidad atmosférica acompañados del estancamiento de los contaminantes en el sur de la ciudad. Los episodios de ozono ocurrieron en las fechas siguientes: 3 de marzo, 8 de abril, 5 de mayo, 9 de mayo, 10 de junio y 4 octubre. Con excepción del episodio que ocurrió en octubre, el resto se presentaron durante la temporada de ozono. En el caso del episodio de partículas, la activación sucedió el 25 de diciembre y fue de carácter regional, este ocurrió por la quema excesiva de juegos de pirotecnia durante las celebraciones de la Nochebuena y Navidad.

En el caso del depósito atmosférico húmedo durante 2015 alrededor del 62% de las muestras reportaron un valor de pH menor a 5.6, que indica la presencia de lluvia ácida. La mayor frecuencia de episodios de lluvia acida se observó en los sitios al sur, en la zona de suelo de conservación. El valor mínimo de pH reportado fue de 3.8 en el sitio de Milpa Alta (MPA), ubicado en la delegación con el mismo nombre al sureste de la Ciudad de México, el sitio se ubica en una zona rural en donde predomina la actividad agrícola.

En este documento se presentan por primera vez los resultados del análisis de carbono negro (reportado como carbono negro equivalente) presente en la fracción fina de las partículas suspendidas (PM<sub>2.5</sub>). Los resultados indicaron que el carbono negro tiene una aportación importante a la masa total de las partículas, contribuyendo con alrededor del 11%. Se presentan además, los resultados de la Campaña 2012 de monitoreo de hidrocarburos precursores del ozono. Esta campaña se realizó para estudiar la relación que existe entre los precursores y los episodios de ozono. Los resultados indican que existe una reducción en las concentraciones de algunos hidrocarburos, en comparación con campañas similares realizadas en años previos. Sin embargo, en el caso de los alquenos se observó un pequeño incremento. Los hidrocarburos asociados al gas LP (propano, n-butano e isobutano), fueron las especies más abundantes. Durante este estudio se identificó la presencia de isopreno que podría tener un origen biogénico, el cual tiene una contribución importante en la producción de ozono. Las especies con un mayor aporte a la formación de ozono fueron el propeno, eteno, isopreno, 1,3-butadieno, propano y el buteno (isómeros cis y trans). Los hallazgos de esta campaña se compararán con los resultados de campañas posteriores.



# 1. Cumplimiento de la normatividad

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

# Actualización de las Normas Oficiales Mexicanas para ozono y partículas

Durante 2013 la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) convocó a investigadores, funcionarios y representantes de la sociedad civil, a la revisión de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establecen los límites permisibles para la concentración de ozono (NOM-020-SSA1-1993) y de partículas suspendidas en el aire ambiente (NOM-025-SSA1-1993). A través de grupos de trabajo se realizó la revisión de la evidencia científica internacional reciente sobre los efectos del ozono y las partículas suspendidas en la salud humana, así como los resultados de estudios realizados en México. Las recomendaciones de estos grupos de trabajo derivaron en la reducción en los valores límite de ambas normas.

El 19 de agosto de 2014 la Secretaría de Salud publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014 bajo la denominación Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. La norma actualizó los valores límite para los promedios de una hora y de ocho horas, además de modificar el indicador para la evaluación del promedio de ocho horas. El valor límite para el promedio de una hora disminuyó de 0.11 ppm (110 ppb) a 0.095 ppm (95 ppb), sin modificar la forma de evaluación. El promedio de ocho horas disminuyó de 0.080 ppm (80 ppb) a 0.070 ppm (70 ppb), calculado como el promedio móvil, la forma de evaluación se modificó del quinto máximo al primer máximo. La evaluación de la norma se realiza por sitio de monitoreo.

El 20 de agosto de 2014 la Secretaría de Salud publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 denominada Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación. La norma deroga el indicador para partículas suspendidas totales (PST) y

actualiza los valores límite para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , así como el indicador estadístico empleado para su evaluación. En el caso de la fracción de partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) la concentración para el promedio de 24 horas disminuyó de 120  $\mu g/m^3$  a 75  $\mu g/m^3$ , evaluado como el valor máximo anual (anteriormente se utilizaba el percentil 98), mientras que el promedio anual pasó de 50  $\mu g/m^3$  a 40  $\mu g/m^3$ . En el caso de  $PM_{2.5}$ , el promedio de 24 horas disminuyó de 60  $\mu g/m^3$  a 45  $\mu g/m^3$ , evaluado como el valor máximo del año (anteriormente se utilizaba el percentil 98), mientras que el indicador para el promedio anual cambió de 15  $\mu g/m^3$  a 12  $\mu g/m^3$ .

La NOM-025-SSA1-2014 derogó el indicador para PST, sin embargo, la NOM-026-SSA1-1993 aún requiere del muestreo de esta fracción para la determinación de plomo en las partículas suspendidas. Se espera que en futuras revisiones de la norma se evalúe la posibilidad de modificar el tamaño de partículas para la determinación del plomo.

Por las características fisiográficas, meteorológicas y de emisiones, la Ciudad de México es susceptible a altas concentraciones de ozono y partículas. La atmósfera de la ciudad se caracteriza por una intensa actividad fotoquímica durante la mayor parte del año que favorece la formación de compuestos secundarios, como el ozono y los aerosoles orgánicos secundarios. La formación de los contaminantes secundarios involucra una gran variedad de precursores de origen natural y antropogénico, que reaccionan a través de mecanismos de fase homogénea y heterogénea, iniciados por los radicales libres (p. e. OH). Algunas de estas reacciones son de tipo fotoquímico. La complejidad en los procesos de formación de los contaminantes secundarios, hacen del control y reducción un gran reto para la gestión de la calidad del aire de la ciudad. El diseño e implementación de las estrategias de control requiere de un sólido conocimiento del problema.

Tabla 1.1. Listado de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental vigentes en 2015.

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Especificaciones	Última actualización
Ozono (O <sub>3</sub> )	NOM-020-SSA1-2014	95 ppb Promedio horario 70 ppb Promedio móvil de 8 horas	19 de agosto de 2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm Promedio móvil de 8 horas	23 de diciembre de 1994
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	NOM-022-SSA1-2010	110 ppb Promedio de 24 horas	8 de septiembre de 2010
		200 ppb Promedio móvil de 8 horas, segundo máximo	
		25 ppb Promedio anual	
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	NOM-023-SSA1-1994	210 ppb Promedio horario	23 de diciembre de 1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM <sub>10</sub> )	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m³ Promedio de 24 horas	20 de agosto de 2014
		40 μg/m³ Promedio anual	
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM <sub>2.5</sub> )	NOM-025-SSA1-2014	45 μg/m³ Promedio de 24 horas	20 de agosto de 2014
		12 μg/m³ Promedio anual	
Plomo	NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m³ Promedio trimestral	23 de diciembre de 1994

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental para el aire ambiente en la Ciudad de México y su área conurbada, durante el año 2015. Para cada uno de los contaminantes criterio se describe su situación con respecto a los valores límite de la NOM, pero también se hace una comparación de las concentraciones máximas observadas contra los valores límite de los estándares vigentes de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) y con los valores

sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En esta evaluación se utilizó el valor del estadístico requerido por la NOM, los estándares de la US EPA y las guías de la OMS. La evaluación del cumplimiento se realizó utilizando los valores máximos registrados en la red, pero también se efectuó de manera desagregada para las dos entidades federativas que conviven en la zona metropolitana. Para el detalle de la evaluación del cumplimiento de las NOM para cada una de las estaciones de monitoreo, se remite al lector al Anexo 4.

#### Dióxido de azufre

Como se ha descrito en informes anteriores, la fuente más importante de dióxido de azufre se localiza fuera de la zona metropolitana, en el corredor industrial de Tula-Tepeji. De acuerdo con Petróleos Mexicanos, el combustible que se distribuye en la zona metropolitana presenta un bajo contenido de azufre, con 15 ppm en el diesel y 14 ppm en la gasolina. Por lo tanto, la presencia de concentraciones elevadas de este contaminante, está directamente asociada con el acarreo desde el norte de la cuenca. Cuando la Ciudad de México no se encuentra bajo la influencia de las emisiones generadas al norte de la cuenca, los niveles son generalmente bajos. A pesar de la influencia de las altas concentraciones provenientes de dicho corredor, las concentraciones del contaminante en el aire ambiente fueron menores a

los valores límite de la norma NOM-022-SSA1-2010 (ver Tabla 1.2). Sin embargo, cuando los datos observados se compararon contra los valores guía de la OMS y el estándar de la U. S. EPA, se observó que los indicadores máximos de dióxido de azufre no cumplen con las recomendaciones de ambas agencias.

En los 17 sitios de monitoreo en donde el número de datos fue suficiente, se observó su cumplimiento con respecto a los valores límite de la NOM. La estación Cuautitlán (CUT), ubicada en el Parque Ecológico Xochitla, en los límites entre los municipios de Tepotzotlán, Cuautitlán y Cuautitlán Izcalli, que se encuentra en la trayectoria de la pluma de contaminación proveniente de Tula-Tepeji, registró los valores máximos para los indicadores de la NOM.

**Tabla 1.2.** Comparación de las concentraciones de dióxido de azufre con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM			OMS	U.S. EPA	
	Máximo 24 h	2° máximo 8 h	Promedio anual	Máximo 24 h	Promedio trianual percentil 99	
Límite permisible	110 ppb	200 ppb	25 ppb	20 μg/m³ *	75 ppb	
Zona metropolitana	63 ppb	146 ppb	8 ppb	129 µg/m³	184 ppb	
Ciudad de México	46 ppb	69 ppb	6 ppb	94 μg/m³	127 ppb	
Estado de México	63 ppb	146 ppb	8 ppb	129 µg/m³	184 ppb	

<sup>\*</sup> Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

# Dióxido de nitrógeno

La concentración de dióxido de nitrógeno no excedió el límite recomendado por la NOM-SSA1-023-1994 de 210 ppb para el promedio horario de la concentración en ninguno de los sitios de monitoreo, durante 2015 (Tabla 1.3).

El valor máximo para el promedio de 1 hora se observó en la estación FES Acatlán (FAC), ubicada en el municipio de Naucalpan de Juárez, en la zona conurbada del Estado de México, con una concentración de 146 ppb. Los valores máximos registrados en los diferentes sitios de monitoreo de la red tampoco excedieron el valor límite recomendado por la guía de la OMS para el promedio de una hora, sin embargo, el promedio anual fue superior al valor guía de la OMS. Con respecto al estándar de la U. S. EPA, el promedio trianual del percentil 99 de la concentración del contaminante fue mayor al límite establecido por dicha agencia, con un valor de 115 ppb, mientras que el valor máximo para el promedio anual fue significativamente menor a dicho estándar con una concentración de 35 ppb.

**Tabla 1.3.** Comparación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM	ON	ИS	U.S. EPA			
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo	Promedio anual	Promedio trianual del percentil 99	Promedio anual		
Límite permisible	210 ppb	200 μg/m³ *	40 μg/m³ *	100 ppb	53 ppb		
Zona metropolitana	0 h	200 µg/m³	52 µg/m³	115 ppb 35 p			
Ciudad de México	0 h	192 µg/m³	52 μg/m³	115 ppb	35 ppb		
Estado de México	0 h	200 μg/m³	49 μg/m³	ug/m³ 105 ppb			

<sup>\*</sup> Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

#### Monóxido de carbono

A pesar del continuo crecimiento que se ha observado en el parque vehicular de la Ciudad de México y su área metropolitana, la concentración del monóxido de carbono se ha mantenido por debajo de los valores límite de la norma NOM-SSA1-021-1993 desde el año 2001 (Tabla 1.4).

Durante 2015, las concentraciones máximas se observaron en los sitios de monitoreo cercanos a las zonas con mayor tránsito vehicular. La estación Iztacalco (IZT), ubicada en la delegación Iztacalco, al oriente de la Ciudad de México, registró un valor máximo de 3.8 ppm para el promedio móvil de 8 horas, este valor estuvo muy por debajo del valor límite de la NOM que es de 11 ppm para el promedio móvil de 8 horas.

A diferencia de los otros contaminantes criterio, el monóxido de carbono es el único contaminante cuyas concentraciones en el aire ambiente se mantienen por debajo de los valores límite establecidos en la NOM, desde hace más de 15 años, pero además las concentraciones máximas del contaminante cumplen con los requerimientos de la OMS y la U.S. EPA. Es importante observar como, a pesar de que el parque vehicular presenta un crecimiento continuo, los niveles de monóxido de carbono se mantienen controlados. Esto se debe principalmente a la continua vigilancia del parque vehicular a través del programa de verificación vehicular y los avances tecnológicos en el control de las emisiones vehiculares.

**Tabla 1.4.** Comparación de las concentraciones de monóxido de carbono con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM	OI	MS	U.S.	U.S. EPA	
	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h	
Límite permisible	11 ppm	30 000 μg/m³ *	10 000 μg/m³ *	35 ppm	9 ppm	
Zona metropolitana	3.8 ppm	7001 μg/m³	3411 μg/m³	7.8 ppm	3.8 ppm	
Ciudad de México	3.8 ppm	4667 μg/m³	3411 µg/m³	5.2 ppm	3.8 ppm	
Estado de México	3.7 ppm	7001 µg/m³	3321 µg/m³	7.8 ppm	3.7 ppm	

<sup>\*</sup> Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

#### Ozono

El ozono es uno de los contaminantes criterio que continúa superando los valores recomendados para la protección de la salud en la Ciudad de México. Con la reciente revisión de la NOM-020-SSA1-2014 se establecieron límites más estrictos para los indicadores de 1 hora y de 8 horas. Esto tuvo como consecuencia un aparente incremento en el número de horas que superaron el valor de la norma, en comparación con los años previos.

En el conjunto de todos los sitios de monitoreo se registraron 776 horas que superaron el valor límite para el promedio de una hora (95 ppb), el mayor número de horas se registró en el territorio de la Ciudad de México con un total de 729 horas (Tabla 1.5). El sitio de Ajusco Medio (AJM) registró el mayor número de horas con concentraciones superiores al valor de la NOM con un total de 418 horas. La nueva NOM estableció un nuevo valor para el promedio de 8 horas de 70 ppb. La concentración máxima observada en la zona metropolitana fue de 130 ppb en la estación Cuajimalpa (CUA), en la delegación Cuajimalpa de Morelos. Del total de estaciones en donde se realizó la medición, en ninguna se logró el cumplimiento de la NOM. Además ninguno de los sitios de monitoreo cumplió con los valores límite de la OMS o del estándar de la US EPA, ya que ambos establecen límites más estrictos.

**Tabla 1.5.** Comparación de las concentraciones de ozono con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM	l	OMS	U.S. EPA		
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo 8 h	Máximo 8 h	Promedio trianual del 4º máximo		
Límite permisible	95 ppb	70 ppb	100 µg/m³ *	75 ppb		
Zona metropolitana	776 h	130 ppb	200 μg/m³	111 ppb		
Ciudad de México	729 h	130 ppb	200 μg/m³	111 ppb		
Estado de México	388 h	124 ppb	191 µg/m³	106 ppb		

<sup>\*</sup> Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

# Partículas menores a 10 µm

Con la reciente actualización de la NOM-025-SSA1-2014, se establecieron valores más estrictos para el promedio de 24 horas (75  $\mu$ g/m³) y el promedio anual (40  $\mu$ g/m³) de la concentración de PM<sub>10</sub>. Se considera que el incumplimiento de la NOM ocurre, cuando la concentración máxima del promedio anual o del promedio de 24 horas, supere los valores límite. Es importante mencionar que la NOM se evalúa utilizando los datos obtenidos con los muestreadores manuales de PM<sub>10</sub>, ya que la norma especifica que la medición debe realizarse con un Método de Referencia.

Con excepción de la estación Pedregal (PED), ubicada en la delegación Alvaro Obregón,

en donde las concentraciones para los promedios de 24 horas y anual fueron menores a los requeridos por la NOM, en el resto de los sitios las concentraciones superaron ambos valores límite. La estación Merced (MER), en la delegación Venustiano Carranza, reportó el promedio de 24 horas máximo con una concentración de 120 µg/m³, mientras que la estación Xalostoc, en el municipio de Ecatepec, registró el promedio anual máximo con un valor de 55.4 µg/m³ (Tabla 1.6).

Los valores máximos del contaminante no cumplen tampoco con los límites propuestos por la OMS, pero sí cumplen con el valor límite del estándar de la U. S. EPA.

**Tabla 1.6.** Comparación de las concentraciones de  $PM_{10}$  con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NC	DM	OM	U.S. EPA		
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2º máximo 24 h	
Límite permisible	75 μg/m³	40 μg/m³	50 μg/m³	20 μg/m³	150 μg/m³	
Zona metropolitana	120 μg/m³	55.4 µg/m³	120 μg/m³	55.4 μg/m³	108 μg/m³	
Ciudad de México	120 μg/m³	43.4 µg/m³	120 µg/m³	43.4 µg/m³	82 µg/m³	
Estado de México	104 μg/m³	55.4 μg/m³	104 µg/m³	55.4 μg/m³	108 µg/m³	

## Partículas menores a 2.5 µm

Al igual que con PM $_{10}$ , con la actualización de la NOM-025-SSA1-2014 los valores para los promedios de 24 horas y anual PM $_{2.5}$  se redujeron a 45 y 12  $\mu$ g/m $^3$ , respectivamente. En 2015 las concentraciones máximas de PM $_{2.5}$  para el promedio de 24 horas de los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México, no superaron el valor de la NOM de 45  $\mu$ g/m $^3$ , sin embargo, en todos los casos se superó el valor del promedio anual. De los sitios ubicados en la zona conurbada del Estado de México, solo San Agustín (SAG), en Ecatepec de Morelos, cumplió con el valor límite para el promedio de 24 horas de la NOM, en el resto de los sitios ubicados en la zona conurbada no se logró el cumplimiento del promedio anual (Tabla

1.7). Es importante mencionar que existe un número menor de monitores de  $PM_{2.5}$  en la Ciudad de México que en la zona conurbada.

La concentración máxima de PM<sub>2.5</sub> en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México continúa superando los valores límite de la NOM. De igual manera, las concentraciones máximas superan los valores requeridos por la OMS y la US EPA. Esto tiene implicaciones importantes en términos de salud pública, ya que se ha reportado que el aumento en la concentración de las partículas de la fracción fina tiene una asociación directa con el incremento en síntomas respiratorios y cardiovasculares, e incluso se ha demostrado que existe una asociación positiva entre PM<sub>2.5</sub> y la mortalidad.

**Tabla 1.7.** Comparación de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la U. S. EPA y la recomendación de la OMS.

	NORMA OFICIA	AL MEXICANA	OM	IS	U.S. EPA		
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2º máximo	Promedio trianual	
Límite permisible	ermisible 45 μg/m³ 12 μg		n³ 25 μg/m³ 10		35 μg/m³	n³ 12 μg/m <sup>3</sup>	
Zona metropolitana	48 μg/m³	27.7 μg/m³	57 μg/m³	27.7 µg/m³	53 μg/m³	27 μg/m³	
Distrito Federal	40 μg/m³	21.3 μg/m³	40 μg/m³	21.3 µg/m³	42 μg/m³	20 μg/m³	
Estado de México	48 μg/m³	27.7 μg/m³	57 μg/m³	27.7 μg/m³	53 µg/m³	27 μg/m³	



# 2. El tiempo

Comportamiento de las variables meteorológicas

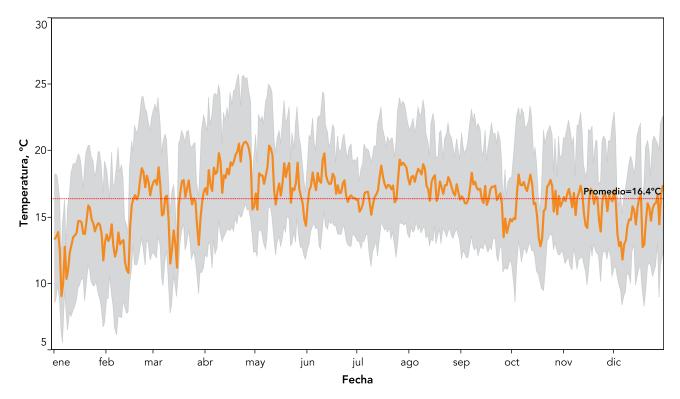
### **Temperatura**

La temperatura promedio en la Ciudad de México y su área metropolitana fue de 16.4 °C, con una mínima de -3.1°C en la estación Cuautitlán (CUT) el 7 de febrero a las 8:00 horas, y un valor máximo de 32°C en la estación FES Acatlán (FAC) el 25 de abril a las 16:00 horas. La Figura 2.1 presenta la serie de tiempo de los promedios diarios de la temperatura durante 2015. Enero fue el más frío con un promedio de 13.5°C, mientras que abril fue el mes más cálido del año con un promedio de 18.7°C (Figura 2.2).

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) entre enero y mayo de 2015 ingresaron al país 30 sistemas frontales. Estos frentes fríos fueron impulsados por masas de aire polar que se desplazaban desde el norte del continente. Durante su avance provocaron la disminución de la temperatura, y al interactuar con otros sistemas meteorológicos locales, favorecieron un aumento en la actividad convectiva de la atmósfera, precipitación, nevadas o vientos intensos. Esto se observó durante los meses de marzo a

mayo, cuando la interacción de estos frentes fríos con humedad proveniente del Pacífico provocaron lluvias atípicas en la región central del país ocasionando una disminución significativa en la temperatura media en la ciudad. Los registros del SMN indicaron niveles de precipitación pluvial por encima de los promedios históricos en todo el país, incluyendo a la Ciudad de México.

En 2015 se presentó un cambio importante en los patrones temporales de la temperatura en la región. La Figura 2.3 presenta la anomalía térmica observada durante este año. La comparación entre los promedios mensuales de 2015, conpromedio mensuales históricos (1990-2014) reveló una disminución en la temperatura promedio de los meses de febrero, mayo y junio, mientras que, para los meses del segundo semestre se observó un incremento significativo en el promedio de temperatura con respecto a los valores históricos. Esta anomalía térmica fue provocada por El Niño que se presentó en una fase intensa en el segundo semestre del año.



**Figura 2.1.** La temperatura de la Ciudad de México durante 2015. La imagen muestra la serie de tiempo del promedio diario de la temperatura ambiente, la línea naranja corresponde al promedio, el área sombreada en gris indica la desviación estándar.

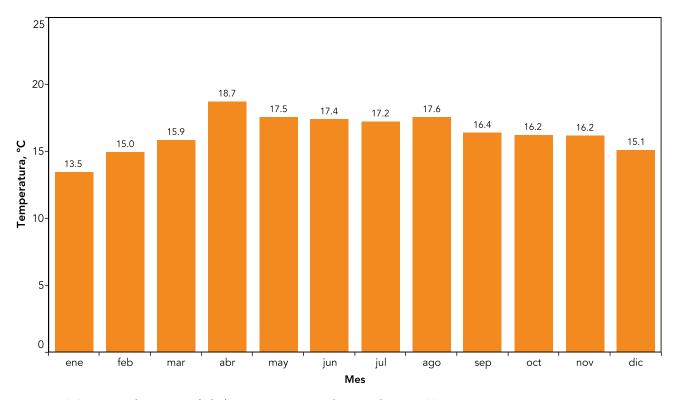
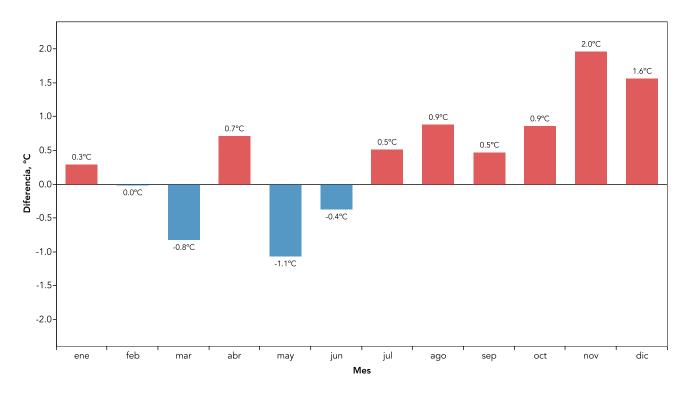


Figura 2.2. Promedio mensual de la temperatura ambiente durante 2015.



**Figura 2.3.** Anomalía térmica en la Ciudad de México para 2015. La gráfica muestra la diferencia entre la temperatura promedio mensual de 2015, con respecto a la temperatura promedio histórica (1990 a 2014).

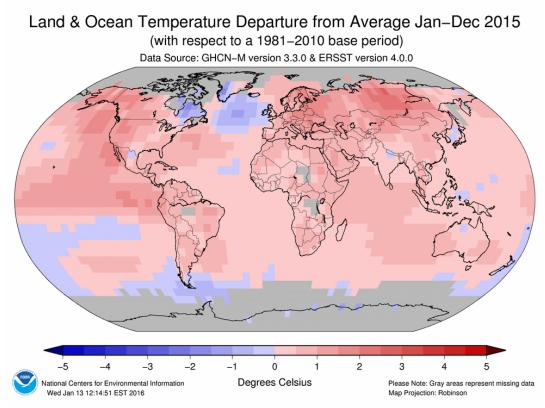
Como se mencionó anteriormente, durante el segundo semestre de 2015 se observó un incremento generalizado en la temperatura ambiente de la Ciudad de México. Los meses de julio a diciembre reportaron incrementos entre 0.5 y 2.0°C en la temperatura, con respecto al promedio histórico (1990-2014). Sin embargo, el invierno de 2015 fue uno de los más cálidos de los últimos 30 años, noviembre y diciembre reportaron un incremento promedio con respecto al promedio histórico de 2.0°C y 1.6°C, respectivamente (Figura 2.3).

El incremento de la temperatura promedio no fue causado por un fenómeno local, de acuerdo con los reportes del SMN durante julio a diciembre de 2015 se registraron incrementos en las temperaturas promedio en todo el país, en comparación con la normal de 1971-2000. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), reportó que el año de 2015 fue el más caluroso a nivel global desde que se tienen registros, mientras que la temperatura global en las superficies

terrestre y oceánica durante el mes de diciembre estuvo por encima del promedio del siglo pasado (NOAA, 2016). La Figura 2.4 muestra el resultado del análisis de la anomalía de la temperatura a nivel global elaborado por la NOAA para 2015.

La NOAA atribuye este calentamiento global al fuerte episodio de El Niño observado durante el segundo semestre de 2015. El fenómeno de El Niño es un calentamiento cíclico que se observa en la superficie del océano Pacífico tropical central y oriental, con temperaturas superiores a la media. Este fenómeno meteorológico tiene impactos en el clima a nivel global, ya que provoca cambios en los patrones regulares de lluvia y temperatura en diversas regiones del planeta.

Si bien la Ciudad de México disfrutó de un invierno cálido, el cambio en los patrones normales de temperatura favoreció mayor inestabilidad atmosférica en el invierno, y se prevé que de mantenerse El Niño en el primer semestre de 2016 se exacerbará la temporada de ozono por el efecto que tendrá en la actividad fotoquímica el aumento de la temperatura ambiente.



**Figura 2.4.** Anomalía de la temperatura global durante 2015. La imagen muestra la desviación promedio de la temperatura de la tierra y el océano durante 2015, con respecto al promedio entre 1981 a 2010. Imagen tomada de la NOAA (https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513, consultado el 13 de mayo de 2016).

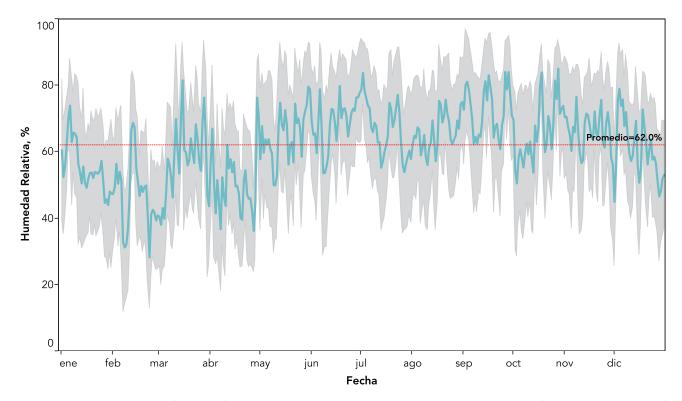
#### Humedad relativa

Este año se caracterizó por un aumento en el transporte de humedad desde el Pacífico asociado principalmente al fenómeno climático de El Niño, que provocó un aumento en el contenido de humedad de la atmósfera, mayor actividad convectiva y precipitación pluvial. En consecuencia la humedad relativa aumentó con respecto a los años anteriores. En 2015 el promedio de la humedad relativa fue de 62.0%, mayor que el registrado durante 2014 que fue de 57.6%.

En la Figura 2.5 se muestra la serie de tiempo de los promedios diarios de la humedad relativa observada en la Ciudad de México y su área metropolitana. En la gráfica se puede observar que durante los meses de la temporada de lluvia, la humedad fue mayor que durante el resto del año, destaca el caso de marzo cuando se observa un incremento en los valores de humedad asociado a la presencia de lluvias atípicas en la ciudad.

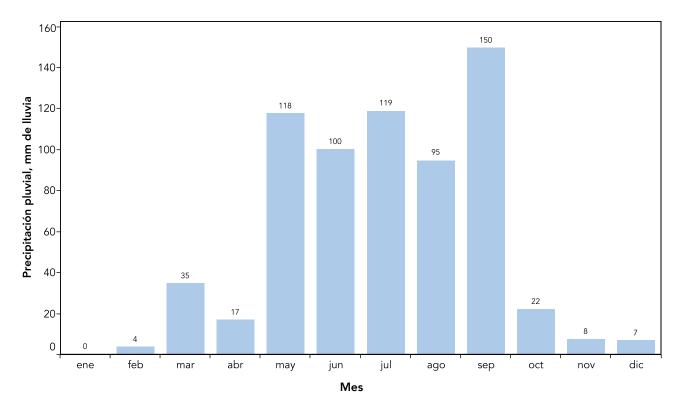
En cuanto a los promedios mensuales, los meses de la temporada de lluvia reportan los máximos valores, mientras que los meses de invierno fueron los más secos del año. El mes de septiembre reportó el promedio máximo con un valor de 73% de humedad, mientras que febrero registró el menor promedio con un valor de 47%. En general los niveles de humedad durante 2015 se observaron dentro de los límites adecuados para el confort humano (40-60%) durante la mayor parte del año.

La humedad se relaciona también con el uso del suelo y la cobertura vegetal. Los sitios ubicados en zonas agrícolas o de suelo de conservación son los que registraron los mayores niveles de humedad, los ubicados dentro de la zona urbana reportaron los mínimos. La estación Cuautitlán (CUT), ubicada dentro del Parque Ecológico Xochitla, en los límites de los municipios de Cuautitlán y Tepotzotlán, en el Estado de México, registró una humedad promedio de 70%; mientras que la estación Xalostoc (XAL), ubicada en el municipio de Ecatepec de Morelos, también en el Estado de México, registró el menor promedio con un valor de 54%.



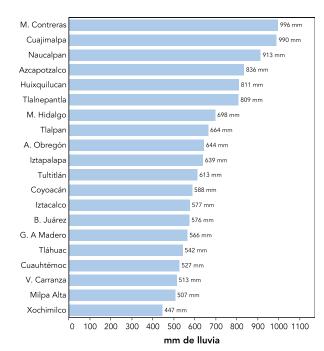
**Figura 2.5.** La humedad relativa en la Ciudad de México durante 2015. La imagen muestra la serie de tiempo del promedio diario de la temperatura ambiente, la línea azul corresponde al promedio, el área sombreada en gris indica la desviación estándar.

## Precipitación pluvial



**Figura 2.6.** Promedio mensual de la precipitación acumulada durante 2015 en la Ciudad de México (elaborada con datos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

La temporada de lluvia en la Ciudad de México se presenta generalmente durante los meses de junio a septiembre, sin embargo, es normal que ocurran episodios ocasionales de lluvia durante mayo y octubre. Durante 2015 se presentaron lluvias atípicas en marzo y abril (Figura 2.6), en mayo se observó un incremento importante en la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación. Este aumento en la precipitación se observó también en varios estados del país, en donde se reportaron máximos históricos de precipitación pluvial, esto relacionado con el fenómeno de El Niño. De acuerdo con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, el mes más lluvioso fue septiembre con un promedio ponderado de 150 mm. El promedio de la precipitación acumulada durante 2015 fue de 672 mm. El valor máximo se reportó en el sitio El Zarco, en la delegación Cuajimalpa, con un valor de 1529 mm de Iluvia. Las delegaciones Magdalena Contreras y Cuajimalpa, en la Ciudad de México, reportaron la mayor cantidad de lluvia del año, mientras que Xochimilco registró el mínimo (Figura 2.7).



**Figura 2.7.** Promedio de los valores acumulados de precipitación (elaborada con datos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

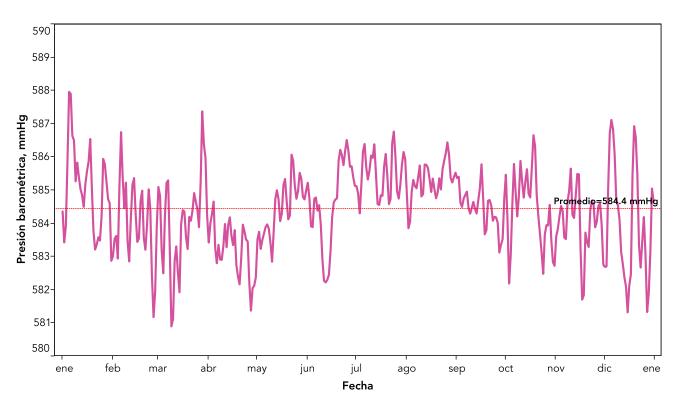
#### Presión barométrica

La fuerza que ejerce la masa de la atmósfera sobre la superficie terrestre se conoce como presión atmosférica o presión barométrica. Esta fuerza es proporcional a la densidad de la atmósfera y disminuye con la altitud. Durante el día, los cambios en la presión dependen de las ligeras variaciones en la densidad y composición de la atmósfera. En un día despejado y seco la presión atmosférica es mayor en comparación con un día húmedo o lluvioso. Por otra parte, las variaciones de la presión atmosférica de gran escala son responsables del movimiento del viento. La Ciudad de México se encuentra a una altura promedio de 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm), por lo tanto su atmósfera tiene alrededor del 23% menos masa que a nivel del mar y la presión barométrica es menor. Se ha observado que la dinámica de los sistemas meteorológicos de escala sinóptica o mesoescala pueden provocar cambios en la presión atmosférica en la región central del país, afectando el tiempo meteorológico local.

La presión atmosférica como indicador indi-

recto de los cambios en la densidad de la masa de la atmósfera, es de utilidad para el pronóstico de corto plazo en las condiciones del tiempo meteorológico. Durante los días en los que la presión es alta y la velocidad de viento es débil, las condiciones son favorables para el estancamiento de la contaminación debido a la escasa dispersión vertical y horizontal de la contaminación. La presencia de un sistema de alta presión directamente sobre la cuenca de México provoca un incremento en la presión barométrica, proporcional a la intensidad del sistema. Las inversiones de subsidencia, que pueden provocar episodios de contaminación durante varios días consecutivos, ocurren dentro de un sistema de alta presión cuando el aire desciende adiabáticamente creando una capa de aire estable. Sin embargo, el desarrollo de una inversión de subsidencia no implica cambios en la presión en la superficie.

En 2015 el promedio de la presión barométrica registrada al nivel de la cuenca fue de 584 mmHg. En la Figura 2.8 se muestran las variaciones diarias de la presión durante el año.



**Figura 2.8.** Serie de tiempo de los promedios diarios de la presión barométrica para las estaciones localizadas en la parte baja de la cuenca de México.

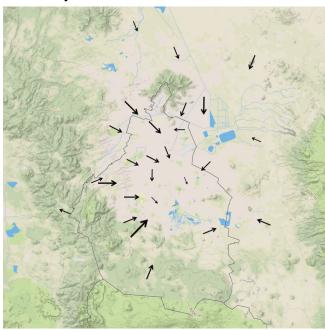
#### **Viento**

Un factor importante que influye directamente sobre el comportamiento de los contaminantes del aire, es el viento local. El viento ocurre por gradientes de presión de escala local o de gran escala. A nivel local las diferencias de presión pueden ocurrir por un calentamiento diferencial de la superficie, los cambios en la topografía, la presencia de tormentas en la zona o las turbulencias locales. En términos de contaminación, el comportamiento del viento, tanto en superficie como en altura, determina el destino de los contaminantes en las masas de aire. En días ventilados la contaminación se dispersa fácilmente, mientras que, en días con ausencia de viento se produce un estancamiento de la contaminación.

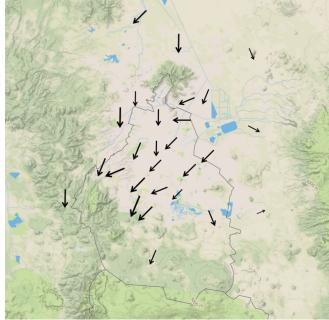
En la Cuenca de México la dirección del viento en la superficie tiene el comportamiento típico de un valle rodeado por montañas. Durante la noche se presenta un flujo débil que desciende por las pendientes de las montañas que rodean la cuenca, impulsado por la brisa de montaña, el viento converge en la región norte y centro de la

ciudad, favoreciendo la acumulación de los contaminantes durante la mañana en esa región. Con la salida del sol, el calentamiento de las pendientes de las montañas, genera un gradiente de temperatura que impulsa la elevación del aire caliente, creando un movimiento de arrastre del viento desde la cuenca conocido como brisa de valle. La brisa de valle, arrastra consigo el aire contaminado desde las zonas de máxima emisión en el norte y centro de la zona urbana hacia el sur. Por la tarde, el aumento en la convección propicia un incremento en la velocidad del viento que permite una mejor dispersión de los contaminantes del aire. La Figura 2.9 ilustra el comportamiento de las brisas de montaña y de valle durante 2015. Este patrón diurno explica porqué durante las mañanas los contaminantes primarios se acumulan en el centro de la zona metropolitana, mientras que después del mediodía las masas de aire contaminado se desplazan hacia el sur, donde las montañas dificultan la libre dispersión y permanecen parcialmente estancadas por la tarde.

Brisa de montaña Flujo de viento nocturno (21:00-7:00)



Brisa de valle Flujo de viento diurno (9:00-13:00)



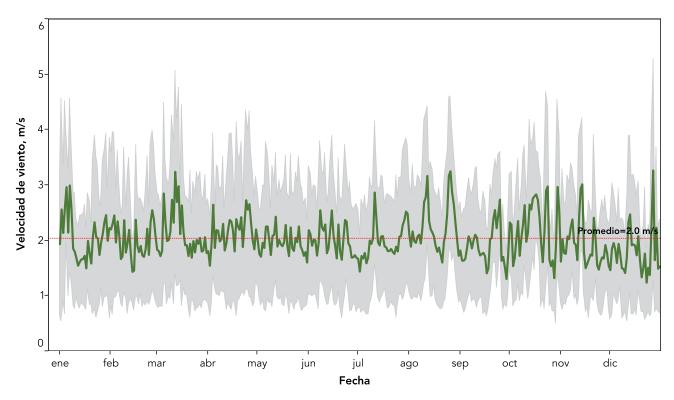
**Figura 2.9.** Brisas de montaña y de valle en la Cuenca de México. La brisa de montaña se forma cuando el aire frío desciende por la ladera de las montañas durante la noche, la brisa de valle se forma cuando el incremento de la temperatura impulsa la elevación del aire caliente en las montañas.

La velocidad promedio del viento en la Ciudad de México fue de 2 m/s. El mes de octubre fue el más ventilado con un promedio de 2.3 m/s. El 23 de octubre la estación Ajusco Medio (AJM) registró el valor máximo para el promedio horario máximo con una intensidad de 11.9 m/s a las 15:00. En la Figura 2.10 se observa que en los meses de abril a junio la velocidad del viento tuvo una menor variabilidad con valores cercanos a la media anual.

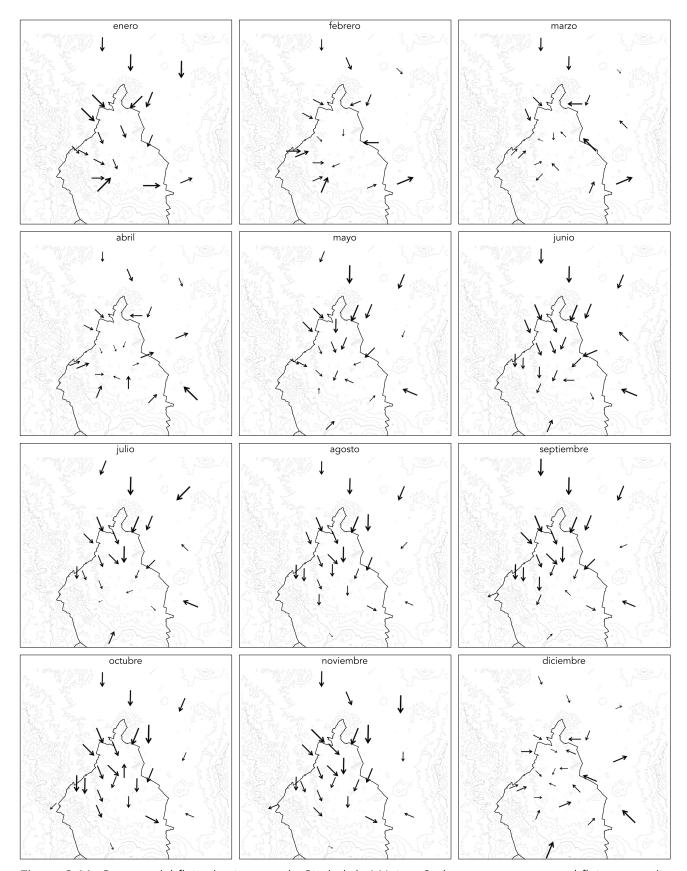
El comportamiento de la velocidad del viento durante el día tiene un patrón característico, con viento débil durante las primeras horas de la mañana, con un incremento gradual a medida que el sol favorece el aumento de la temperatura del suelo y genera un movimiento convectivo de las masas de aire, hasta alcanzar un valor máximo alrededor de las 18:00 horas. La velocidad desciende nuevamente durante la noche.

La dirección predominante del viento en la cuenca fue de norte a sur durante la mayor parte del año (Figura 2.11). En los meses de febrero, marzo, abril y diciembre no se observó una estructura definida en los patrones dominantes del vien-

to, sin embargo, cuando se analizó la información con mayor detalle se observó una componente del sur que predominó durante la noche, mientras que durante el día se mantuvo una corriente predominante del noreste. Estos patrones de viento son un claro indicador del movimiento del aire, y por lo tanto de los contaminantes, dentro de la cuenca. La Figura 2.12 muestra los vectores promedio del viento para cada día del año, calculados a partir de los datos de todas las estaciones de monitoreo. Durante más del 50% de los días del año la dirección predominante del viento en la cuenca tiene alguna componente norte. El hecho de que las principales fuentes de emisión de contaminación se ubiquen al norte de la zona metropolitana, tiene un impacto severo en la calidad del aire al sur de la Ciudad de México, donde existe un menor número de fuentes. Durante el acarreo los contaminantes experimentan cambios químicos para formar compuestos secundarios (como el ozono). Esto implica que la mejora de la calidad del aire en el sur de la ciudad, requiere aplicar acciones para el control en las emisiones al norte y centro de la zona metropolitana.



**Figura 2.10.** Serie de tiempo de la velocidad de viento en la Ciudad de México y área metropolitana durante 2015. En la gráfica la línea verde indica el promedio diario, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.



**Figura 2.11.** Campos del flujo de viento en la Ciudad de México. Cada vector representa el flujo promedio mensual calculado para cada una de las estaciones de monitoreo.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
1	<b>&gt; 1.0</b>	1.3	↓ 0.4	0.5	↓ 0.8	1.6	- 0.1	↓ 0.9	<b>►</b> 0.2	1.9	↓ 0.2	0.5
2	1.8	1.1 حر	<b>∼</b> 0.3	✓ 0.3	, 0.2	√ 1.1	\ 0.4	↓ 0.7	~ 0.4	1.9	0.8	↓ 0.5
3	1.1	1.4	<b>∼</b> 0.5	<b>↓</b> 1.1	<b>→</b> 0.4	↓ 0.6	/ 0.2	<b>↓</b> 1.3	↓ 0.3	~ 0.3	→ 0.4	↓ 1.0
4	1.6	→ 0.2	0.3	2.0	↑ 0.9	~ 0.6	→ 0.2	↓ 0.9	- 0.1	✓ 0.3	↓ 0.6	↓ 1.0
5	2.6	1.7	2.0	<b>↓</b> 1.0	<b>→</b> 0.6	→ 0.2	↓ 0.3	` 0.4	↓ 0.6	1.2	1.2	↓ 0.8
6	1.5	1.4	1.4	↓ 1.4	<b>~</b> 0.2	↓ 0.4	→ 0.1	↓ 0.6	↓ 0.7	1.8	1.3	↓ 1.1
7	2.5	↓ 0.5	~ 0.6	1.4	↓ 0.5	√ 1.4	✓ 0.2	↓ 0.2	<b>1</b> .0	↓ 0.3	1.7	1.0
8	2.0	↓ 0.5	∼ 0.4	← 0.4	- 0.1	↓ 2.0	↓ 0.5	↓ 0.3	✓ 0.7	↓ 0.5	2.1	<b>√</b> 0.2
9	0.9	<b>↓</b> 1.5	→ 0.4	<b>↓</b> 0.8	↓ 0.2	<b>↓</b> 1.6	↓ 0.5	↓ 0.8	✓ 0.7	1.5	<b>1</b> .3	↓ 0.7
10	<b>~</b> 0.3	↓ 0.6	↑ 0.6	↓ 1.3	↓ 0.2	<b>↓</b> 1.3	↓ 1.0	2.0	0.7	2.0	1.2	- 0.3
11	↓ 0.3	→ 0.6	→ 0.4	<b>\</b> 0.8	✓ 0.5	√ 1.2	1.8	2.1	<b>→</b> 0.9	1.4	₹ 0.8	<b>→</b> 0.8
12	1 0.0	<b>↓</b> 0.6	<b>1</b> 2.4	1 0.8	<b>\</b> 0.9	~ 0.5	<i>→</i> 0.2	√ 2.4	<b>↓</b> 0.3	1.5	1.6	<b>7</b> 1.7
13	<b>₹</b> 0.2	1.2	2.0	↑ 0.5	<b>\</b> 0.4	~ 0.4	✓ 0.4	1.4	<b>↓</b> 0.7	2.0	2.6	<b>7</b> 1.6
14	<b>∼</b> 0.4	↓ 0.8	1.3 حر	↑ 0.8	\$ 0.8	1.4	~ 0.5	1.3	\ 0.4	2.2	2.6	0.9
15	↓ 0.2	<b>→</b> 0.3	1.3	0.8	` 0.6	1.0	✓ 0.7	↓ 1.1	✓ 0.8	2.5	1.3	<b>/</b> 1.0
16	<b>▼</b> 0.2	<b>1</b> 1.4	<b>7</b> 1.6	↑ 0.8	← 0.2	· 0.1	↓ 0.8	↓ 0.8	← 0.6	2.4	1 0.1	<b>7</b> 0.8
17	<b>√</b> 0.1	→ 0.3	₹ 0.2	↓ 0.3	√ 0.4	↓ 0.5	✓ 0.3	✓ 0.2	- 0.1	2.5	<b>7</b> 0.6	<b>~</b> 0.6
18	1.2	<i>₄</i> 0.1	1 0.6	<b>/</b> 1.3	1.3	↓ 0.6	↓ 0.3	↑ 0.7	↓ 0.4	2.4	<b>→</b> 0.6	1.3
19	↓ 0.8	↓ 1.0	<b>\</b> 0.3	<b>/</b> 1.1	~ 0.5	← 0.6	✓ 0.5	t 0.1	<b>1</b> .4	2.0	1.0	↓ 0.6
20	- 0.1	→ 0.3	√ 0.1	↑ 0.9	- 0.3	√ 0.2	↓ 0.5	↓ 0.4	1.3	<b>1</b> .2	<b>↓</b> 0.6	∼ 0.3
21	<b>↑</b> 1.1	✓ 0.2	↑ 0.9	- 0.2	<b>↓</b> 1.4	~ 0.2	- 0.1	<b>≠</b> 0.1	2.1	<b>\</b> 0.7	1.8	<b>↓</b> 0.6
22	<b>/</b> 1.4	↓ 0.2	- 0.1	↓ 0.6	← 0.4	↓ 0.7	√ 0.2	- 0.1	2.2	<b>&gt;</b> 1.0	1.6	<b>→</b> 0.5
23	<b>1</b> 0.9	↓ 0.9	<b>√</b> 0.5	<b>→</b> 0.5	€ 0.7	↓ 1.3	↓ 0.4	↓ 1.0	1.8	<b>7</b> 2.3	↓ 0.3	<b>†</b> 0.5
24	<b>&gt;</b> 0.6	↓ 0.4	<b>~</b> 0.4	<b>1</b> 2.0	↓ 0.6	<b>↓</b> 1.4	↓ 0.3	1.9	2.1	<b>1</b> .5	↓ 0.4	- 0.2
25	↓ 0.8	<b>/</b> 1.4	<b>≯</b> 1.0	1.3	↓ 0.3	↓ 0.8	↓ 0.6	2.6	2.4	· 0.3	- 0.1	→ 0.2
26	1.4	↑ 1.3	<b>&gt;</b> 0.9	1.7	1.5	↓ 0.5	↓ 0.9	2.7	1.0	\ 0.4	√ 0.4	<b>7</b> 1.5
27	1.4	1.3	↓ 0.9	, / 1.2	← 0.5	↓ 0.5	↓ 1.0	2.6	∼ 0.4	1 0.4	← 0.4	<b>1</b> 2.3
28	1.7	1.1	<b>←</b> 0.2	↓ 0.3	✓ 0.2	↓ 0.3	↓ 1.1	2.4	<b>→</b> 0.6	0.2	1.2	0.6
29	1.7		\ 0.4	← 0.6	<b>↓</b> 0.2	↓ 0.4	↓ 1.6	1.9	↑ 0.3	<b>→</b> 0.8	1.0	↑ 1.3
30	↓ 0.8		↓ 1.3	<b>0.5</b>	<b>\</b> 0.5	0.5	1.5	<b>\</b> 0.7	<b>\</b> 0.9	<b>7</b> 2.4	← 0.3	· • 0.3
31	1.2		↓ 0.7		↓ 0.8		<b>↓</b> 1.7	↓ 0.2		<b>7</b> 1.6		< 0.2

**Figura 2.12.** Dirección predominante del flujo de viento para cada día del año durante 2015. Los vectores se calcularon a partir del promedio vectorial de todas las estaciones de monitoreo por día. La punta del vector indica la dirección hacia donde sopla el viento, el número representa la velocidad promedio.

#### Altura de mezclado

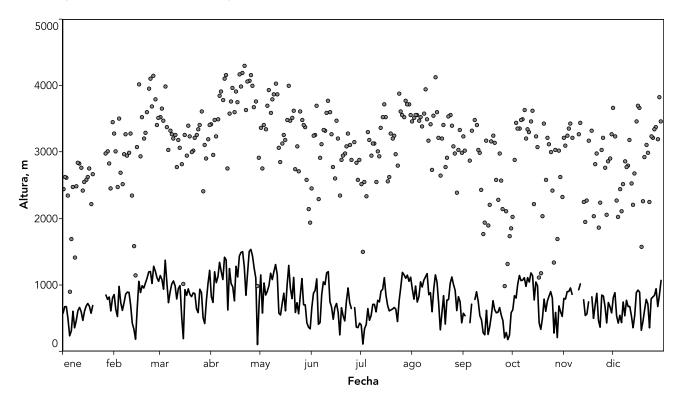
La dispersión y transporte de los contaminantes dependen en gran medida de la estructura vertical de la capa de la atmósfera más cercana al suelo. En esta zona ocurren los procesos de mezclado vertical de los contaminantes. Para los propósitos de esta sección se define a la altura de mezclado o de mezcla, como la altura de la capa adyacente a la superfice sobre la cual cualquier componente emitido o arrastrado dentro de ella se dispersa verticalmente por convección o turbulencia mecánica (Seibert et al. 2000), y representa la altura máxima que pueden alcanzar los contaminantes liberados a nivel de la superficie.

Una parcela de aire que se eleva desde la superficie de la Tierra aumentará a un ritmo determinado (llamado el gradiente seco adiabático). Mientras la masa de aire es más caliente que la temperatura ambiente, continuará ascendiendo, sin embargo, una vez que esté más fría que la temperatura del medio ambiente, disminuirá su velocidad de ascenso y finalmente se detendrá. Es en este punto en donde la temperatura de la

parcela cruza la curva que indica el perfil de temperatura vertical, el que determina la altura de mezcla.

Debido a que la altura de mezclado no puede ser observada directamente, su estimación se realiza indirectamente a partir de mediciones del perfil de la temperatura atmosférica o con modelos de simulación. La altura de mezclado no es constante y sigue un ciclo diurno que depende de los parámetros meteorológicos, los flujos turbulentos y las características fisiográficas de la superficie. Generalmente es mayor en áreas urbanas que en las zonas rurales.

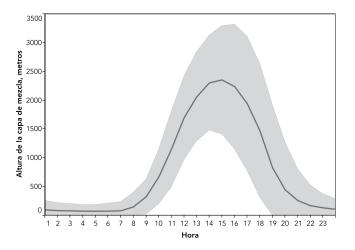
En términos de la calidad del aire, la altura de mezclado representa un indicador del volumen disponible para la dilución de los contaminantes e influye directamente en su variabilidad a lo largo del día. Una mayor altura de capa de mezcla, permite una mayor dilución de los contaminantes, reduciendo su concentración. Una baja altura se asocia con menor dilución y un incremento en la concentración de los contaminantes.



**Figura 2.13.** Comportamiento de la altura de mezclado durante 2015. En la gráfica la línea continua indica el promedio diario de la altura, los puntos corresponden a la altura máxima alcanzado por la capa. La altura de mezclado se calculó a partir de los perfiles de temperatura.

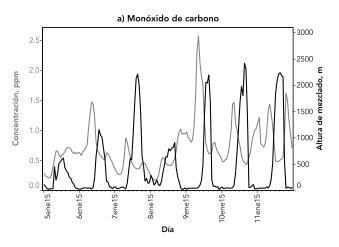
Cuando se analizan los perfiles de los contaminantes primarios, se observa que disminuyen rápidamente a partir de las 9:00 horas a pesar de que no existe una reducción en las emisiones. Esta disminución esta relacionada con el crecimiento de la capa de mezcla, entre mayor sea la altura de la capa mayor será la dilución. De esta manera la altura de la capa de mezcla modula las variaciones diurnas de la concentración de los contaminantes. En la Figura 2.15 se presenta un ejemplo de la relación que existe entre la concentración de los contaminantes y la altura de la capa de mezclado para diferentes contaminantes del aire. El día 5 de enero, la altura máxima de la capa de mezcla fue de apenas 619 m, esto provocó un aumento en la concentración de todos los contaminantes a lo largo del día, provocado por la escasa dispersión vertical y agravado por la falta de viento en superficie. En contraste, el día 7 de enero la altura máxima de la capa de mezcla fue de 2216 m, y se observa una disminución en la concentración de todos los contaminantes la cual es mayor cuando se alcanza la altura máxima de mezclado. Cuando se presenta una inversión térmica de superficie, está actúa como una tapa sobre la capa de mezclado limitando su desarrollo.

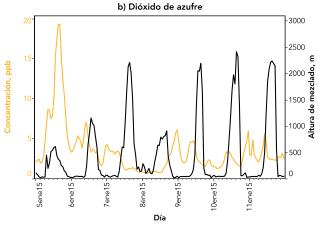
El promedio de la altura máxima de mezclado en 2015 fue de 2998 m. Los valores máximos se observaron en abril, mientras que los menores en enero y septiembre (Figura 2.13). Las mayores alturas se alcanzaron en la temporada más caliente del año. Durante el día, la altura máxima se alcanza

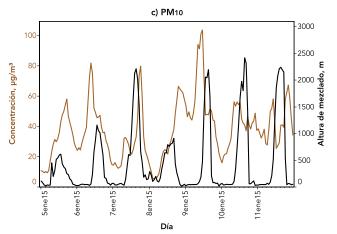


**Figura 2.14.** Perfil promedio de la altura de mezclado durante 2015. La línea indica el valor promedio, la región en gris corresponde a la desviación estándar.

entre las 14:00 y 16:00, cuando la temperatura del aire es mayor. Por la tarde disminuye gradualmente hasta alcanzar un mínimo durante la noche (Figura 2.14).







**Figura 2.15.** Efecto de la altura de mezclado en la concentración del monóxido de carbono (a), dióxido de azufre (b) y  $PM_{10}$  (c).

#### Radiación solar ultravioleta

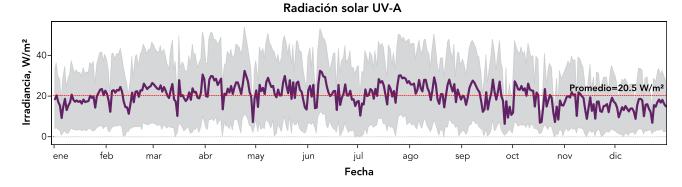
La Ciudad de México se encuentra localizada en una latitud de 19°N, dentro de la zona intertropical, por lo tanto, recibe una gran cantidad de radiación solar durante la mayor parte del año con una intensidad máxima en el verano. Además, por su altitud promedio de 2240 metros sobre el nivel del mar, recibe una mayor intensidad que si se encontrara a nivel del mar.

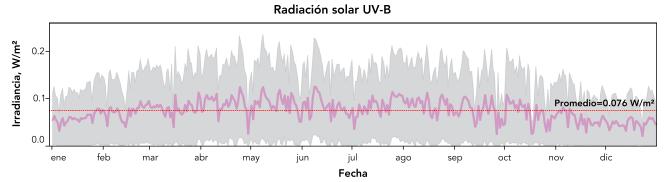
La intensidad de la radiación solar es menor durante diciembre cuando los días son más cortos y el sol alcanza una menor altura en el cielo (47.2°) al mediodía (solar). La máxima intensidad se observa durante el mes de julio, en el verano, cuando los días son más largos y la posición máxima del sol se encuentra muy cerca del cenit (el 26 de julio el sol alcanzó una posición máxima de 90° al mediodía solar). A pesar de esto los meses del verano no son los que reportan las mayores intensidades de radiación, esto debido a la nubosidad asociada a la temporada de lluvia que atenúa significativamente la intensidad de la radiación solar.

Una fracción mínima del espectro de la ra-

diación solar que alcanza la superficie corresponde a la radiación ultravioleta (UV), con longitudes de onda entre 280 a 440 nm. La región comprendida entre 280 y 315 nm corresponde a la radiación UV-B, mientras que la zona comprendida entre 315 y 400 nm corresponde a la radiación UV-A. El cuerpo humano requiere de la radiación UV para la síntesis de la vitamina D, sin embargo, una exposición prolongada puede provocar diversos tipos de daños en el tejido expuesto, que van desde una quemadura leve hasta el desarrollo de cáncer de la piel. La Ciudad de México se encuentra ubicada en una zona de gran riesgo por la radiación solar, es por ello que su monitoreo es fundamental.

Durante 2015 el promedio de la radiación solar UV-A durante el periodo diurno (8:00 a 20:00 horas) fue de 20.46 W/m² mientras que el promedio de la radiación UV-B fue de 0.076 W/m². En la Figura 2.16 se presentan las series de tiempo de la radiación solar durante 2015, los máximos se reportan en primavera y los mínimos en invierno.





**Figura 2.16.** Serie de tiempo de los promedios diurnos de la radiación solar ultravioleta A y B. En la gráfica la línea continua indica el promedio de la intensidad de la radiación solar entre las 8:00 y 20:00 para cada día, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar.

#### Índice de radiación solar ultravioleta

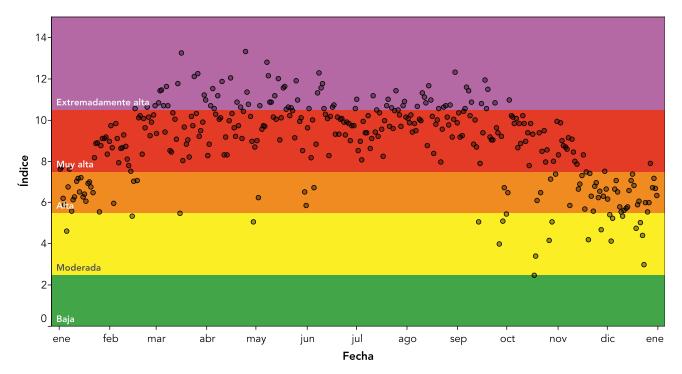
El índice de radiación solar ultravioleta o índice UV es un indicador del riesgo asociado a la exposición excesiva a la radiación solar ultravioleta. El índice UV (IUV) describe el nivel de la radiación UV solar en la superficie. La escala de los valores del índice parte de cero en adelante, donde el cero indica la ausencia de radiación. Entre más alto es el valor del índice, mayor será la intensidad de la radiación y mayor será el riesgo de daño a la piel y los ojos, y menor será el tiempo que toma para que el daño se produzca.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003) la evidencia actual indica que los hábitos personales en relación con la exposición al sol, representan el factor de riesgo más importante de daño por radiación UV. El IUV es un medio importante para elevar la conciencia pública sobre los riesgos de la exposición excesiva a la radiación UV, y para alertar a las personas sobre la necesidad de adoptar medidas de protección. Alentando a las personas a reducir su exposición al sol, a través del cambio de sus hábitos

de exposición, es posible atenuar los efectos nocivos para la salud y reducir significativamente los costos de salud.

Utilizando los promedios horarios de la radiación UV para estimar el valor promedio del Índice UV, en 2015 se registraron 65 días con una intensidad máxima en la categoría de ALTA (IUV entre 6 y 7), 224 días con intensidad máxima MUY ALTA (IUV entre 8 y 10) y 40 días con una intensidad máxima EXTREMADAMENTE ALTA (IUV mayor a 11). El valor máximo se registró el 14 de abril con un Índice UV de 13. Entre los meses de febrero a noviembre la intensidad de la radiación implica un riesgo importante para la salud. Pero es durante los meses de primavera cuando se observó el mayor riesgo.

El periodo del día en el que se presenta la mayor intensidad de la radiación solar generalmente ocurre entre las 11:00 y las 15:00 horas. Durante ese periodo es indispensable el uso de un filtro o bloqueador solar, cuando una persona permanece en exteriores.

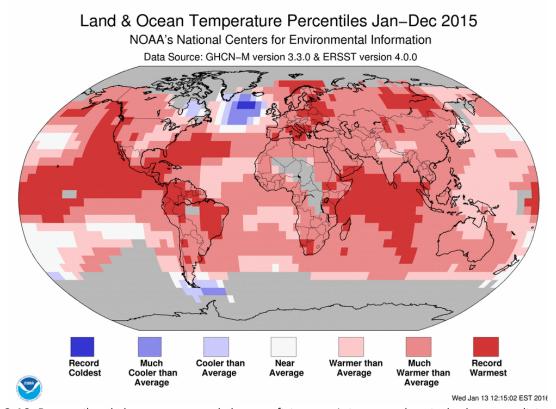


**Figura 2.17.** Valores máximos para el índice de radiación solar ultravioleta (IUV) durante 2015. Los valores máximos se observaron durante la primavera (marzo a junio), mientras que los mínimos se observaron durante los meses de invierno (enero, diciembre).

## El Niño: su impacto en el tiempo meteorológico y la calidad del aire

De acuerdo con el State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de la Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) la temperatura promedio global sobre las superficies terrestre y oceánica del 2015 fue la más alta desde el comienzo de los registros en 1880 (NOAA, 2016). Por otra parte, la desviación de la temperatura global de la superficie de la tierra y el océano en diciembre 2015 fue la más alta en el registro de 136 años. Gran parte del aumento de la temperatura global se atribuye a los incrementos de la temperatura en los océanos del mundo, que alcanzaron valores récord. La temperatura promedio anual de la superficie de los océanos de todo el mundo fue de 0.74 °C. Este incremento en la temperatura de los océanos fue provocado por el fenómeno climático de El Niño que se desarrolló con la fase más intensa de la que se tenga registro en la primavera del Hemisferio Norte en el océano Pacífico oriental y ecuatorial central (Figura 2.19). Los valores récord de calor fueron notables en grandes partes del Pacífico, una amplia franja del Atlántico Norte occidental, la mayor parte del océano Índico, y partes del océano Ártico. Al igual que en 2014, algunas de las aguas del océano Austral frente a la punta de América del Sur y parte del océano Atlántico al sur de Groenlandia fueron mucho más frías que la media.

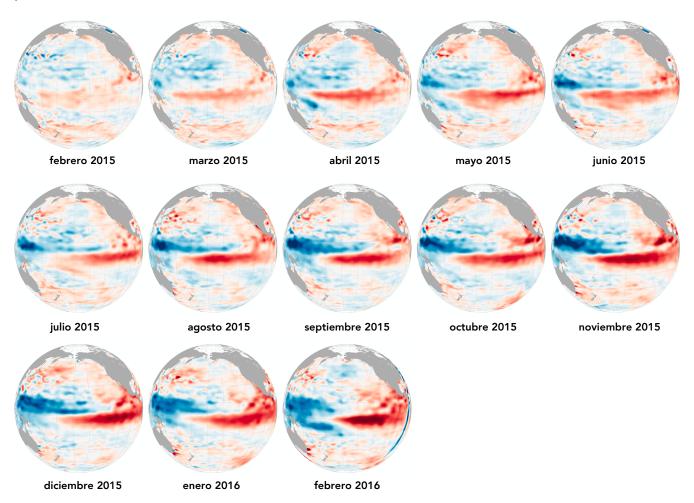
La mayoría de las áreas del mundo experimentaron temperaturas superiores al promedio anual, como se muestra en la Figura 2.18. En varias regiones de la superficie terrestre del mundo se registraron récords de calor. Sólo una parte de Quebec, en el noreste de Canadá, y de la punta sur de Argentina fueron más frías que el promedio. Por otra parte, en cuanto a la precipitación ésta estuvo ligeramente por debajo del promedio sin embargo, la mitad oriental de los Estados Unidos fue notablemente húmeda, al igual que algunas regiones del sur de Sudamérica, partes del norte y sureste de Europa, y algunas áreas de Japón. Además, las precipitaciones y la sequía extrema se produjeron en todo el mundo.



**Figura 2.18.** Percentiles de la temperatura de la superficie y oceánica para el periodo de enero-diciembre de 2015 (Fuente: https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513, consultado el 13 de marzo de 2016).

En México, el Servicio Meteorológico Nacional reportó récords históricos de temperatura y precipitación en varios estados de la República. En marzo se observó un incremento de 373% en la precipitación con respecto al promedio histórico, mientras que en junio Baja California y Baja California Sur registraron incrementos con respecto al promedio. La Ciudad de México experimentó una primavera húmeda por la presencia de precipitaciones atípicas en marzo, abril y mayo. Por otra parte, en el segundo semestre se observó un incremento en la temperatura promedio, por lo que la ciudad experimentó uno de los inviernos más cálidos de los que se tiene registro. En promedio noviembre y diciembre reportaron un incremento de 2 °C y 1.6 °C, respectivamente, con respecto al promedio histórico de 1990 a 2014.

El Niño también tiene un efecto en las tormentas tropicales durante la temporada de huracanes. El área de convección del Pacífico tropical y su circulación de Hadley, asociada se amplia hacia el este desde el Pacífico occidental. Al mismo tiempo, la circulación ecuatorial de Walker es más débil que la media. Estas condiciones provocan sobre el Pacífico central y oriental vientos de nivel superior más débiles y menor cizalladura vertical, lo que favorece una mayor actividad de huracanes (Figura 2.20). Por otra parte, en el Atlántico provoca vientos fuertes del oeste en los niveles altos y alisios más fuertes de nivel inferior, que aumentan la cizalladura vertical del viento, incrementa también la cantidad de movimiento descendente y el aumento de la estabilidad atmosférica suprimiendo la actividad de huracanes en el Atlántico.

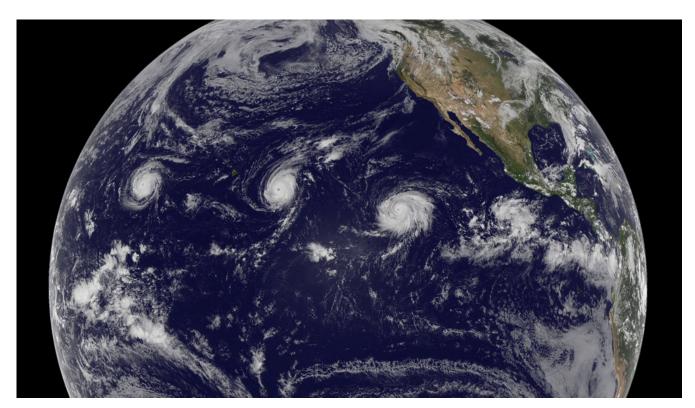


**Figura 2.19.** Anomalía térmica en el océano Pacífico. Las mediciones provienen del altímetro del satélite Jason-2 y muestran el promedio de anomalías de altura de la superficie del mar. Los tonos rojos indican donde el océano se situó por encima del nivel normal del mar; el agua más caliente se expande para llenar más volumen. Los tonos de azul muestran donde el nivel del mar y las temperaturas fueron más bajas que la media (contracción de agua). Las condiciones normales del nivel del mar aparecen en blanco. Créditos: NASA Earth Observatory.

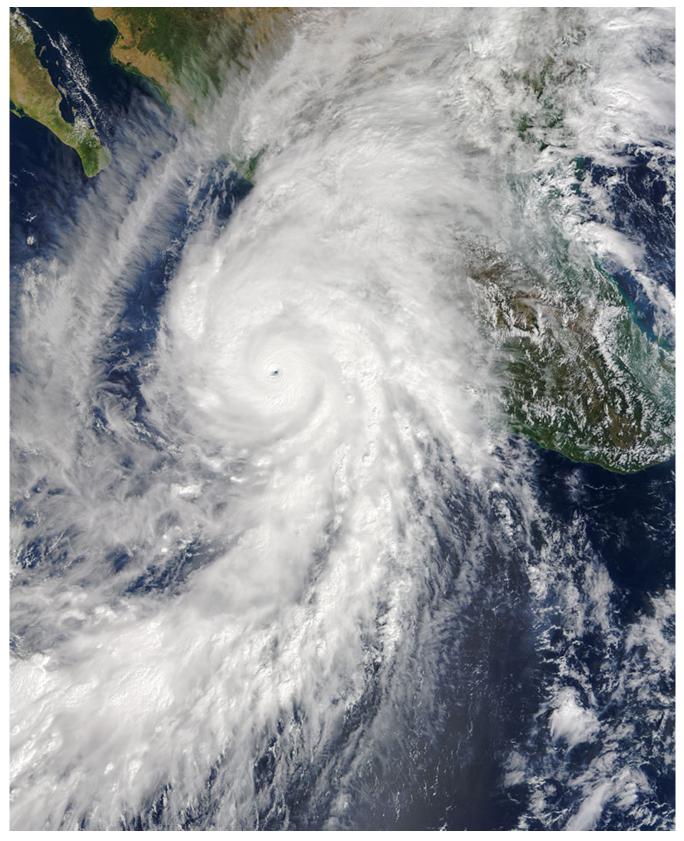
Durante la temporada de huracanes 2015 se registraron 18 tormentas tropicales en el Pacífico incluyendo 13 huracanes de Categoría 3 o mayor, el número más alto registrado desde 1971. Además, el incremento en la actividad convectiva incrementa la fuerza de los huracanes. En octubre 22 el Huracán Patricia pasó de Categoría 3 a 5 en menos de 24 horas, alcanzando velocidades de viento sostenido de hasta 345 km/h, convirtiéndolo en el huracán más intenso observado en el hemisferio occidental (Figura 2.21).

En términos de la calidad del aire el aumento de la actividad convectiva de la atmósfera y la presencia de precipitación pluvial durante la temporada de ozono tuvo un impacto positivo en la calidad del aire, por la inestabilidad atmosférica asociada y el efecto de lavado atmosférico de la lluvia. La concentración promedio de ozono se redujo en 12 % con respecto al promedio de los 5 años previos. Durante el invierno, el incremento en la temperatura contribuyó a atenuar la temporada por el aumento en la altura de capa de mezclado, la disminución en la intensidad de las inversiones térmicas y una ligera atenuación de la esta-

bilidad atmosférica. Sin embargo, a pesar de la influencia positiva que El Niño tuvo en la calidad del aire en 2015, para el siguiente año se prevé un impacto negativo. Con la presencia de El Niño durante el primer semestre de 2016, no se prevé lluvias durante la temporada de ozono, pero podría mantenerse la anomalía térmica y el incremento en la temperatura global. Se ha reportado que un aumento en la temperatura ambiente por los fenómenos glo-bales, podría incrementar la producción del ozono troposférico (Zeng & Pyle, 2003; Liao et al., 2006). Por otra parte, diversos estudios han reportado que El Niño contribuye al incremento en los episodios de incendios forestales por la sequía, provocando un aumento en las emisiones de aerosoles y otros contaminantes (Doherty et al., 2006; Chandra et al., 2009). En consecuencia se prevé que en 2016 El Niño podría intensificar la temporada de ozono y provocar un incremento en la concentración de partículas durante el primer semestre de 2016, situación que se vería agravada por el aumento en las emisiones vehiculares por los recientes cambios al Programa Hoy No Circula.



**Figura 2.20.** A finales de agosto de 2015 los satélites de la NASA observaron el desarrollo simultáneo de tres tormentas en el Océano Pacífico que intensificaron a huracanes de Categoría 4 con vientos máximos sostenidos de 150 mph. Las tormentas recibieron los nombre de Kilo, Ignacio y Jimena. Créditos: NOAA-NASA GOES Project.



**Figura 2.21.** Imagen del huracán categoría 5 Patricia en el océano Pacífico capturada por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite Terra de la NASA. Patricia fue la tormenta más intensa que se ha registrado en el Hemisferio Occidental. Créditos: NASA's Earth Observatory.



# 3. Calidad del aire

Distribución espacial, temporal y tendencias

# Dióxido de azufre

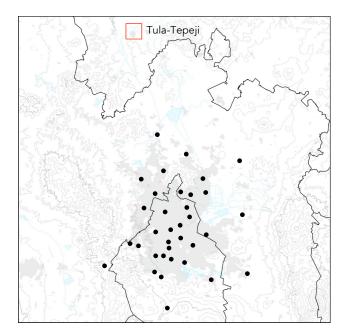
El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro que se produce principalmente durante la quema de combustibles fósiles que contienen azufre. Algunas fuentes naturales como las emisiones volcánicas y los incendios forestales, pueden tener una contribución importante en la concentración de este contaminante. De acuerdo con el inventario de emisiones 2014 (SEDEMA, 2016), en la zona metropolitana se arrojan cada año a la atmósfera 1696 toneladas de este contaminante, de las cuales el 68% son emitidas por la industria. El dióxido de azufre es un precursor del ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y desempeña un papel importante en la química de los aerosoles. La neutralización del ácido sulfúrico por el amoniaco o algunos minerales del polvo del suelo contribuye a la concentración de partículas finas.

Debido a que el dióxido de azufre es soluble en agua, durante la respiración se disuelve y oxida en las membranas mucosas de la nariz y el tracto respiratorio, provocando irritación en esas zonas. Una alta concentración de este contaminante puede dañar los pulmones. A concentraciones mayores a 1.5 ppm se pueden presentar constricción bronquial e infecciones respiratorias (Jacobson, 2012). La exposición de largo plazo se asocia con problemas en la función respiratoria y otros problemas respiratorios.

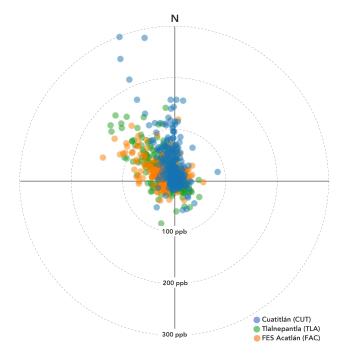
Actualmente el diesel y la gasolina que se consumen en la zona metropolitana contienen bajas concentraciones de azufre (14 ppm en diesel y 15 ppm en la gasolina), el diesel que se utiliza a nivel industrial tiene un contenido de azufre similar al empleado por el transporte, en consecuencia la concentración del dióxido de azufre emitido por la actividad de la ciudad es baja, sin embargo la principal fuente de este contaminante se encuentra localizada a 60 km al noroeste de la ciudad, en el corredor industrial de Tula-Tepeji (Figura 3.1). La contribución del corredor industrial es significativa cuando la dirección predominante del viento es de norte a sur (Figura 3.2) y la altura de la capa de mezcla es baja. Durante un episodio es posible observar el avance gradual del penacho originado en el corredor industrial fumigando la ciudad, a través de las mediciones en las estaciones de monitoreo (ver Figura 3.3). A medida

que avanza la pluma la concentración se diluye gradualmente. Aún cuando estos episodios pueden ocurrir en cualquier momento del año, se observan con mayor frecuencia durante los meses de invierno, esto se debe a que durante el invierno la altura de capa de mezclado es menor y la dirección predominante del viento es del norte de la cuenca.

Mientras se desplaza desde su fuente de origen, ocurren reacciones químicas de oxidación de los óxidos de azufre dentro de la masa de aire contaminado, formando ácido sulfúrico que al reaccionar con el amoniaco atmosférico o con las partículas minerales puede formar sulfatos. Estos compuestos se encuentran en forma de partículas y tienen una contribución importante en la concentración de la masa de los aerosoles atmosféricos, además participan en la acidificación de los aerosoles y del agua de lluvia. En la fracción de PM<sub>2.5</sub> la concentración del ion sulfato representa alrededor del 10 % de la masa total, mientras que en el depósito atmosférico húmedo contribuye con hasta el 30% de los iones solubles en el agua de Iluvia.

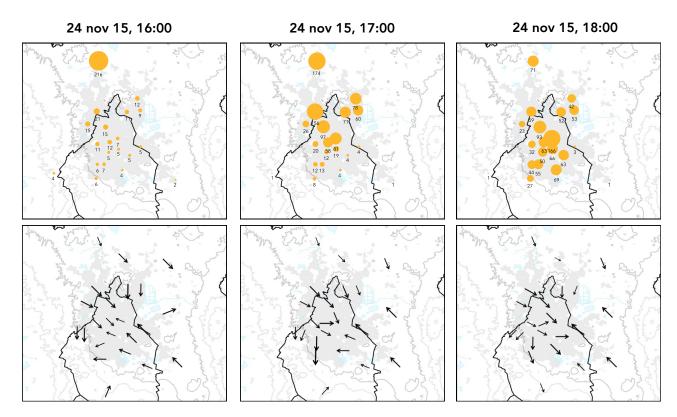


**Figura 3.1.** Ubicación del corredor industrial Tula-Tepeji. Los puntos negros corresponden a las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

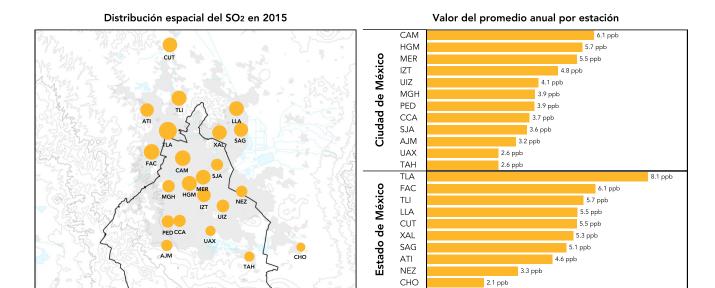


**Figura 3.2.** Rosa de contaminación para los promedios horarios de dióxido de azufre durante los meses de noviembre y diciembre, en los sitios CUT, TLA y FAC.

Durante 2015 el promedio anual de la concentración del contaminante en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México fue de 4.4 ppb. No se observó cambio significativo en el promedio anual con respecto al valor reportado en 2014. Al desagregar por entidad, el promedio para los sitios ubicados en Ciudad de México fue de 4.2 ppb, mientras que para la zona conurbada del Estado de México fue de 4.9 ppb. El sitio de monitoreo de Tlalnepantla (TLA), ubicado en el municipio de Tlalnepantla de Baz en el Estado de México, registró el promedio anual máximo con un valor de 8.1 ppb. Mientras que la estación Chalco (CHO), ubicada al sureste en el municipio de Chalco, Estado de México, registró el menor promedio con un valor de 2.1 ppb. En la Figura 3.4 es posible observar un gradiente en el promedio de la concentración anual a lo largo del eje noroeste y sureste, con valores máximos en los sitios de monitoreo ubicados al noroeste de la zona metropolitana, mientras que los promedios mínimos se observaron en los sitios del sureste.



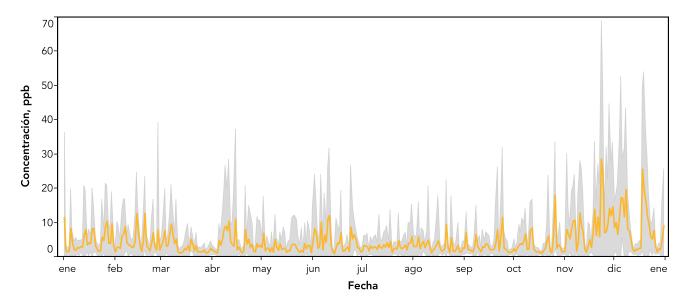
**Figura 3.3.** Desplazamiento a través de la Ciudad de México y su área metropolitana de una masa de aire contaminado con dióxido de azufre generada en el corredor industrial Tula-Tepeji, durante la tarde del 24 de noviembre de 2015 entre las 16:00 y 18:00. Para cada hora se muestran las concentraciones promedio horarias y los vectores viento predominantes en las diferentes estaciones de monitoreo.



**Figura 3.4.** Promedio anual de la concentración de dióxido de azufre, en el mapa (izquierda) el tamaño del círculo es proporcional al valor del promedio anual. Se emplearon los sitios que contaban con más del 60% de datos válidos.

Las estaciones ubicadas al norte, no solo se encuentran expuestas a la influencia de la pluma de contaminantes transportada desde el corredor industrial de Tula-Tepeji, también reciben contribuciones de las zonas industriales locales y del tránsito vehicular. Sin embargo, estas contribuciones son significativamente menores, como se ha observado en aquellos días en los que las condiciones meteorológicas no favorecen el

acarreo de los contaminantes desde el noreste. En los sitios ubicados al sur, en donde existe un menor número de fuentes de emisión, la mayor contribución de dióxido de azufre proviene del acarreo del contaminante desde el norte. Por lo anterior los promedios anuales en las estaciones de monitoreo del norte de la zona metropolitana, pueden ser entre dos y cuatro veces mayores que los observados en los sitios del sur.



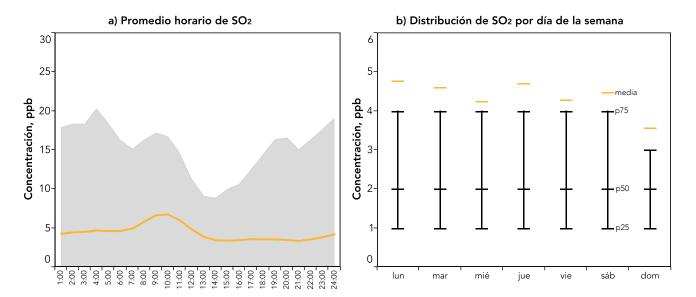
**Figura 3.5.** Serie de tiempo con la concentración promedio diaria del dióxido de azufre, el promedio (línea amarilla) se calculó para todas las estaciones de monitoreo de la Ciudad de México y área metropolitana. La región marcada en color gris corresponde a la desviación estándar.

En la Figura 3.5 se presenta la serie de tiempo de los promedios diarios, en ella se puede observar la variabilidad del contaminante durante el año. Las concentraciones máximas se presentaron durante noviembre y diciembre con promedios diarios superiores a 10 ppb. Durante la temporada de lluvia las concentraciones disminuyeron significativamente. Si bien el transporte y la industria tienen contribuciones importantes en la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente, el comportamiento temporal del contaminante a lo largo del año estuvo dominado por la contribución de las emisiones del corredor industrial Tula-Tepeji. En noviembre y diciembre, cuando las condiciones meteorológicas fueron favorables para el transporte del contaminante, se registraron concentraciones con valores superiores a las 200 ppb, principalmente durante los periodos nocturnos cuando la altura de la capa de mezcla es mínima.

Cuando ocurren los episodios de transporte de la masa de aire contaminado desde el corredor industrial Tula-Tepeji hacia el sur, la Sierra de Guadalupe representa una barrera física que impide el libre paso del viento. Durante un episodio la pluma puede ingresar por la región de Tlalnepantla, al noroeste, o por la región de Ecatepec, al noreste. En ambos casos, el avance de la pluma continúa hacia el centro y sur de la ciudad, diluyéndose gradualmente. Estos patrones de

dispersión tienen un efecto importante en el incremento de las concentraciones horarias del dióxido de azufre en las estaciones ubicadas en esas zonas, así como, en los promedios anuales del contaminante (Figura 3.4).

La concentración horaria máxima del contaminante fue de 299 ppb, el 22 de noviembre a las 23:00 en el sitio de monitoreo Cuautitlán (CUA), ubicado en los límites de los municipios de Cuautitlán y Tepotzotlán, en el Estado de México. Este sitio se encuentra en la trayectoria de la pluma que proviene de la zona Tula-Tepeji. Como se muestra en la Figura 3.6a, las concentraciones máximas de dióxido de azufre se observaron entre las 9:00 y 10:00, lo que podría asociarse con las emisiones vehiculares primarias y el inicio de la actividad industrial, sin embargo, lo que destaca son la presencia de concentraciones elevadas y un aumento en la variabilidad durante la noche y madrugada; como se comentó esto se debe a que por la noche disminuye la altura de la capa de mezcla y el viento generalmente proviene del norte favoreciendo el transporte y acumulación originado en la zona industrial. Con respecto a los días de la semana, el jueves fue el que registró los máximos valores, mientras que el día domingo se registraron las menores concentraciones, lo anterior se explica por la contribución asociada a las emisiones de parque automotor y la actividad industrial local.



**Figura 3.6.** Distribución de la concentración de dióxido de azufre por hora del día (izquierda) y por día de la semana (derecha). Lo promedios mostrados en la Figura b están fuertemente sesgados por los valores extremos.

# Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) se generan en los procesos de combustión por la reacción entre el nitrógeno y oxígeno atmosféricos. El término óxidos de nitrógeno generalmente hace referencia a la suma de las concentraciones de óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno u óxido nitroso ( $NO_2$ ).

El dióxido de nitrógeno es un gas de color rojo pajizo, con un olor característico. Es un compuesto que actúa como intermediario entre la emisión de óxido nítrico y la formación de ozono. Es también un precursor del ácido nítrico, que desempeña un papel importante en la formación de la lluvia ácida y en la producción de aerosoles secundarios. La fuente más importante de dióxido de nitrógeno es la oxidación del óxido nítrico. La quema de combustibles fósiles y de biomasa produce una pequeña cantidad de dióxido de nitrógeno, entre el 5% y el 15% de los óxidos de nitrógeno totales (NO<sub>x</sub>). De acuerdo con el inventario de emisiones más reciente (SEDEMA, 2016) anualmente se emiten 138,454 toneladas de óxidos de nitrógeno, de las cuales el 78% son emitidas por el parque vehicular.

En concentraciones elevadas el dióxido de nitrógeno puede provocar daño en los pulmones e incrementar las infecciones respiratorias, sin embargo, la evidencia epidemiológica sugiere que la exposición a las concentraciones típicas encontradas en el aire ambiente tiene poco impacto en la salud. Los niños y asmáticos son los más sensibles a las enfermedades asociadas con altas concentraciones del contaminante. La exposición a concentraciones mayores a 80 ppb puede provocar dolor de garganta, resfriados y ausentismo escolar. Una exposición entre 300 y 800 ppb puede reducir la capacidad pulmonar en alrededor de 10%. El NO<sub>2</sub> puede activar el asma a través del daño o irritación y sensibilizar los pulmones, haciendo más susceptible a la respuesta alérgica (Jacobson, 2012).

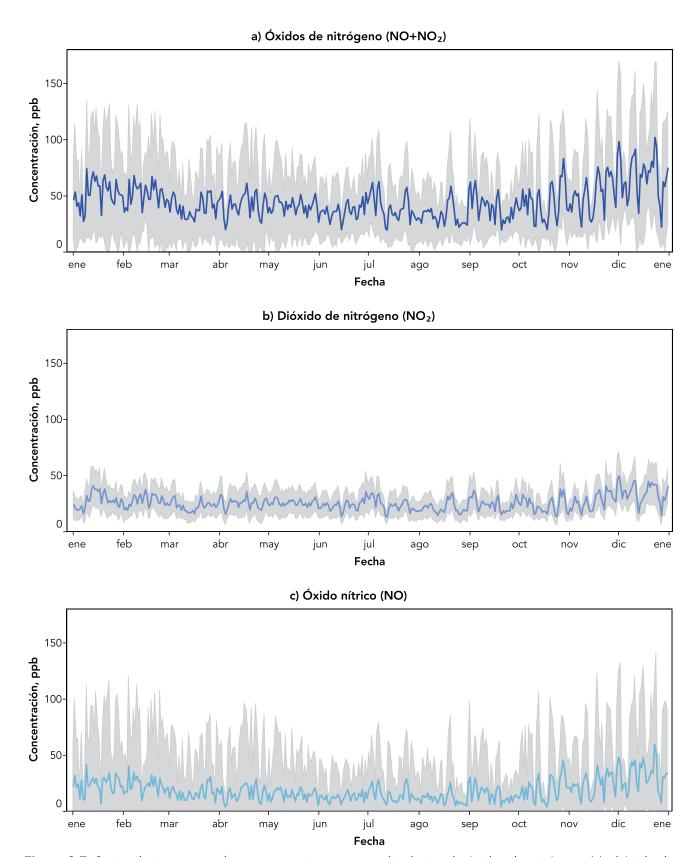
Durante la emisión, el óxido nítrico es la especie más abundante. La concentración máxima de este compuesto generalmente se observa durante las mañanas (entre las 6:00 y las 10:00) con un pico máximo alrededor de las 8:00, cuando se presenta la mayor intensidad del tránsito vehicular

y la altura de la capa de mezcla es mínima. Durante los meses de invierno aumenta la concentración del contaminante en el aire ambiente (Figura 3.7) por el aumento en la frecuencia de los episodios de inversión térmica y consecuente disminución en el volumen de dilución. Las estaciones con las concentraciones máximas de los contaminantes se ubican al centro y norte de la zona metropolitana, en las áreas con una mayor densidad de vialidades y con un tránsito vehicular intenso.

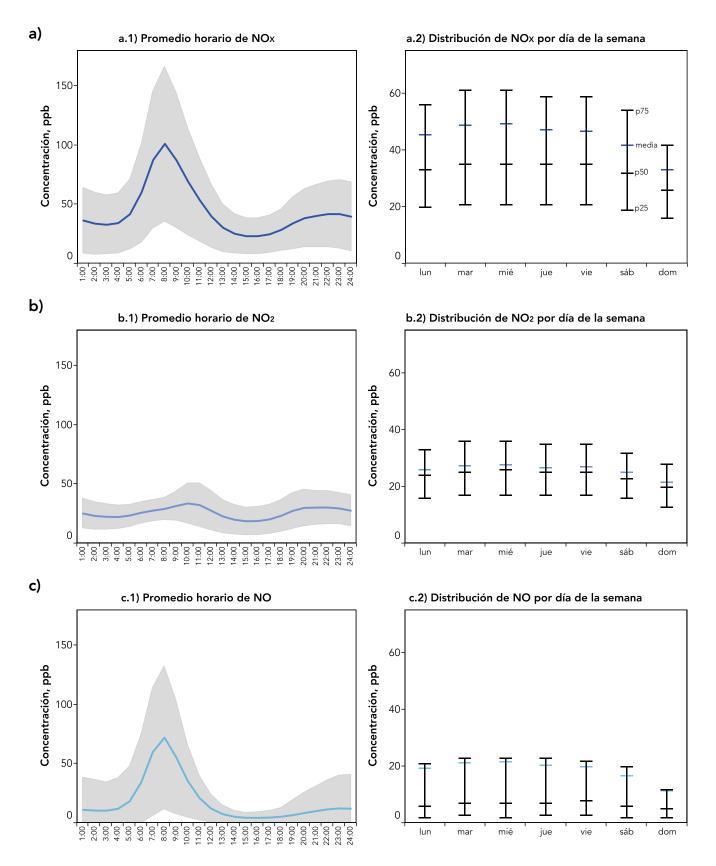
Una vez emitido a la atmósfera el óxido nítrico se oxida rápidamente a dióxido de nitrógeno. Las concentraciones típicas de dióxido de nitrógeno reportadas en la Ciudad de México, no representan un riesgo importante para la salud, sin embargo, la mayor importancia de este contaminante se relaciona con su participación como precursor del esmog fotoquímico, el dióxido de nitrógeno participa en la producción de ozono vía fotólisis. Por su origen secundario, las concentraciones máximas de dióxido de nitrógeno se observan generalmente entre las 9:00 y 12:00, con un pico alrededor de las 10:00, después de los máximos de óxido nítrico, pero antes que las concentraciones máximas de ozono (ver Figura 3.8).

Durante 2015 los promedios anuales de  $NO_x$ , NO<sub>2</sub> y NO en la Zona Metropolitana fueron de 44.8, 18.8 y 26.0 ppb, respectivamente. Para NO y NO<sub>x</sub> los promedios anuales son mayores en los sitios ubicados en el Estado de México, mientras que para NO<sub>2</sub> el promedio anual es mayor en la Ciudad de México (Figura 3.9). Esto debido a que en los municipios conurbados circula el parque vehicular más antiguo y existe un mayor número de industrias, en comparación con la Ciudad de México. En el caso del NO<sub>2</sub>, que es predominantemente de origen secundario, las máximas concentraciones se reportaron en las estaciones de monitoreo del centro, por una contribución de las emisiones locales y las transportadas desde el norte de la zona metropolitana.

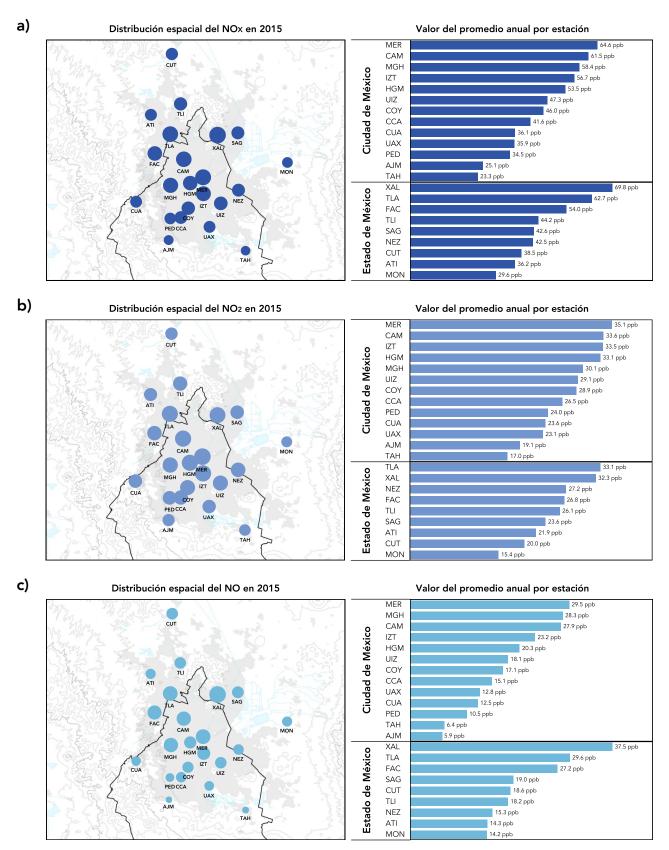
Los valores máximos observados para el promedio horario de  $NO_X$ ,  $NO_2$  y NO fueron 717 ppb (Xalostoc, 23 de enero), 136 ppb (FES Acatlán, 1 de diciembre) y 664 ppb (Xalostoc, 23 de enero), respectivamente.



**Figura 3.7.** Series de tiempo con las concentraciones promedio diarias de óxidos de nitrógeno (a), dióxido de nitrógeno (b) y óxido nítrico (C), la línea de color indica el promedio diario, la zona gris corresponde a la desviación estándar.



**Figura 3.8.** Distribución por hora (izquierda) y día de la semana (derecha) de las concentraciones horarias de óxidos de nitrógeno (a), dióxido de nitrógeno (b), y óxido nítrico (c).



**Figura 3.9.** Promedio anual de la concentración de los óxidos de nitrógeno (a), dióxido de nitrógeno (b) y óxido nítrico (c), por sitio de monitoreo. En los mapas de la izquierda el tamaño del círculo es proporcional al valor del promedio anual. En los gráficos se emplearon los sitios con más del 60% de datos válidos.

Este año se observaron cambios interesantes en el comportamiento temporal del contaminante, relacionados posiblemente con los cambios en el programa de verificación vehicular realizados entre 2014 y 2015. De acuerdo con el inventario de emisiones de 2014, alrededor del 78% de las emisiones de óxidos de nitrógeno provienen de los vehículos, por lo tanto cualquier cambio en los patrones del tránsito vehicular o en la composición del parque vehicular, debe tener un impacto directo en las concentraciones ambientales de los contaminantes asociados a las emisiones vehiculares, tanto evaporativas como de emisiones. De igual manera, un cambio en la proporción de la concentración de óxidos de nitrógeno con respecto a la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV) tendrá un impacto en la concentración de ozono. En un ambiente sensible a (COV) la disminución de óxidos de nitrógeno favorecera un incremento en la producción de ozono.

La comparación de los datos de los meses enero a mayo de 2015, con respecto a los mismos meses de 2014 indica una disminución durante 2015, sin embargo, para el resto de los meses (junio a diciembre) en la mayoría se observa un incremento con respecto a 2014, con un máximo en diciembre (Figura 3.10). Si bien, en la mayoría de los casos la diferencia no es estadísticamente significativa, un cambio mínimo en la concen-

tración de óxidos de nitrógeno tendría un impacto importante en la composición de la atmósfera y en los procesos de formación de los contaminantes secundarios. Este incremento se observó también, en mayor proporción, en el dióxido de nitrógeno que desempeña un papel fundamental en la producción de ozono. Por lo tanto, sería de esperarse que un incremento en la concentración de dióxido de nitrógeno provoque un incremento en la concentración de ozono y los aerosoles secundarios.

Cuando se analizaron los datos con respecto a los promedios por día de la semana se observó un cambio importante. En años previos los valores máximos de óxidos de nitrógeno ocurrían los viernes, esto por el incremento usual en el tránsito vehicular durante ese día. En 2015 el promedio máximo por día de la semana no se observó el viernes, sino el miércoles (Figura 3.8). El miércoles, además de aumentar el valor promedio, en los gráficos de distribución se observa un incremento en las concentraciones con respecto al resto de los días de la semana. Los mínimos continuaron observándose el domingo. Un comportamiento similar se observó en el monóxido de carbono, PM<sub>10</sub> y también en los resultados del análisis de carbono negro. Lo anterior sugiere un posible cambio en la composición o distribución de la flota vehicular, que provocó una alteración en los patrones regulares de los contaminantes.

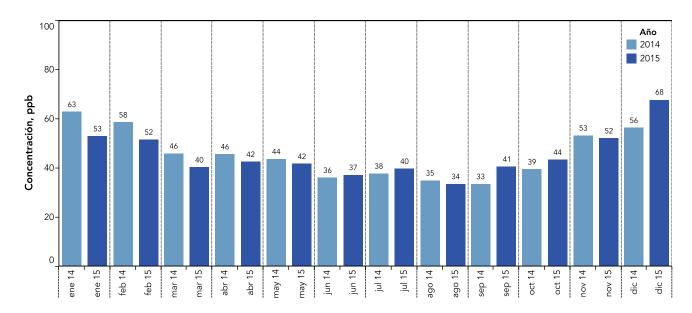


Figura 3.10. Comparación de los promedios mensuales de óxidos de nitrógeno entre 2014 y 2015.

## Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas insaboro, incoloro e inodoro. En la atmósfera desempeña un papel menor como gas de efecto invernadero por su capacidad de absorber pequeñas cantidades de energía infrarroja. Tiene una escasa contribución a la producción de ozono troposférico, aerosoles o depósito atmosférico. En el aire ambiente es un gas que tiene efectos importantes en la salud humana cuando se encuentra en concentraciones elevadas. Se produce durante la combustión incompleta de los combustibles fósiles y la quema de biomasa. En interiores se genera en los calentadores de agua y estufas de gas. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el parque vehicular es la fuente de emisión más importante con una contribución anual de 696,288 toneladas (SEDEMA, 2016), que corresponde al 96% de la emisión total.

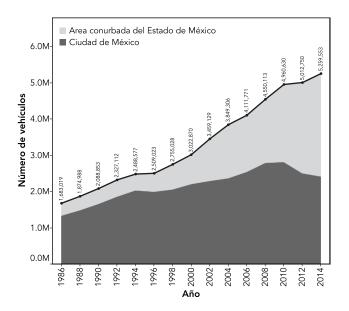
La exposición a este gas provoca efectos a corto plazo en la salud. Una exposición a concentraciones mayores a 300 ppm durante una hora provoca dolor de cabeza, mientras que la exposición a una concentración mayor a 700 ppm durante una hora puede provocar la muerte por asfixia (Jacobson, 2012). El envenenamiento por monóxido de carbono ocurre al disolverse en la sangre y reemplazar el oxígeno en la hemoglobina. Interfiere con la difusión del oxígeno en la mitocondria y en la oxidación celular. Para la mayoría de las personas, los efectos agudos de la exposición al monóxido de carbono son reversibles al disminuir la exposición al contaminante, sin embargo, después de la exposición es posible experimentar síntomas neurológicos o sicológicos durante algún periodo de tiempo.

El monóxido de carbono se emite principalmente a través del escape de los vehículos y está fuertemente relacionado con otros contaminantes emitidos a través del escape de los vehículos como los hidrocarburos (Jaimes-Palomera, et al. 2016), los óxidos de nitrógeno y el carbono negro (Baumgardner et al., 2000). Esta asociación permite emplear al monóxido de carbono como un sucedáneo de estos compuestos.

En la zona metropolitana existe un crecimiento continuo en el parque vehicular, principalmente en el área conurbada del Estado de México

(Figura 3.11). En 2014 el total de vehículos matriculados fue de 5,259,553 vehículos, de los cuales el 54% correspondieron a la zona conurbada del Estado de México y el 46% restante a la Ciudad de México. Este registro no incluye a los vehículos con placas federales o foráneas. Además del impacto en la calidad del aire, este incremento continuo del parque vehicular afecta los patrones de circulación y los hábitos de movilidad en la ciudad.

En la década de los 90 se hablaba de "horas pico" en el tránsito vehicular, en las cuales se observaban los valores máximos de vehículos en circulación y generalmente correspondían con los horarios de inicio y conclusión del periodo laboral. Sin embargo, con el crecimiento del parque vehicular y los cambios en los patrones de movilidad de la ciudad, las horas pico fueron reemplazadas por un máximo casi continuo de vehículos (Figura 3.12) durante los días laborables (lunes a viernes), en donde el número de vehículos en circulación se mantiene relativamente constante entre las 8:00 y 20:00, con pequeños incrementos alrededor de las 8:00, 15:00 y 19:00, que corresponde a las horas de inicio de labores, comida y fin de labores. Destaca el hecho de que el movimiento de la circulación inicia a partir de las 5:00 y concluye después de la medianoche.



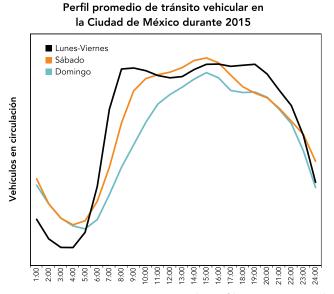
**Figura 3.11.** Vehículos registrados en la Ciudad de México y su área metropolitana entre 1996 y 2014.

El hecho de que las personas tengan que recorrer distancias cada vez más largas para acudir a sus centro de trabajo o estudio, extiende los periodos de la circulación de vehículos y con ello el consumo de combustible y la cantidad de contaminantes generados. En sábado el incremento en el tránsito vehicular inicia más tarde que durante los días laborables y alcanza un pico máximo entre las 14:00 y 16:00, que corresponde a la hora de la comida o cuando la población realiza algunas actividades recreativas. En domingo existe una disminución significativa en el tránsito vehicular durante las horas de la mañana y la tarde, con un máximo entre las 14:00 y 16:00.

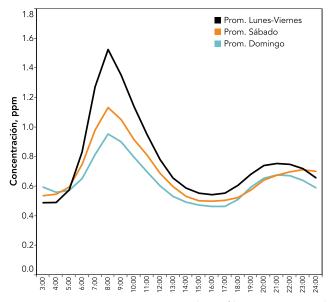
Durante los fines de semana existe un notorio incremento en el número de vehículos en circulación durante las noches, el cual no se observa en los días laborables, este aumento está asociado con la actividad recreativa nocturna en la ciudad. Este fenómeno tiene un impacto en la contaminación del día siguiente, ya que el incremento en la emisión de contaminación ocurre durante el periodo nocturno, cuando la atmósfera es más estable y la altura de capa de mezcla es mínima. Este fenómeno también ha sido observado por Velasco et al. (2009), y se ha denominado como party effect o "efecto fiesta". Esto tiene consecuencias directas en la química atmosférica nocturna, que se ha estudiado poco en la ciudad, y también en

la formación de los contaminantes secundarios del siguiente día, por la acumulación de precursores de ozono y de aerosoles durante la noche. La formación de radicales libres en el periodo nocturno tiene un papel importante en la formación del esmog fotoguímico.

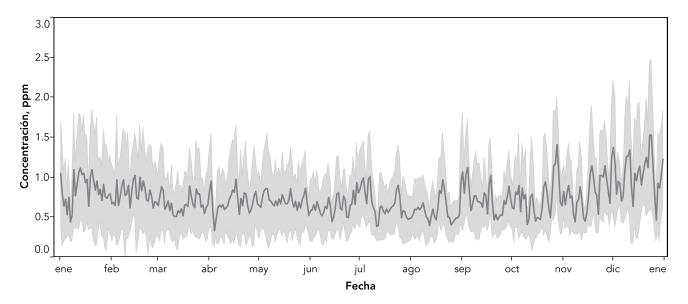
Debido a que el monóxido de carbono es un gas escasamente reactivo en la atmósfera, su concentración en el aire ambiente depende significativamente de la emisión y de las características de dilución de la atmósfera. Por lo tanto, su variabilidad durante el día depende de la intensidad de las emisiones, la variación de la altura de la capa de mezcla y la estabilidad atmosférica. En la Figura 3.12 se muestran los perfiles horarios del contaminante de manera diferenciada para los días laborables y del fin de semana. La concentración del contaminante aumenta a medida que incrementa el número de vehículos en circulación durante las primeras horas de la mañana, alcanzando un máximo alrededor de las 8:00. El aumento en la altura de la capa de mezcla provoca una disminución en la concentración, al aumentar el volumen de dilución. El incremento en la velocidad del viento de superficie y del movimiento vertical favorecen la dispersión después del mediodía. Por la tarde se observa un segundo pico de concentración entre las 19:00 y 23:00 horas, pero de menor intensidad que el pico matutino (Figura 3.13).



**Figura 3.12.** Comparación del perfil promedio del tránsito vehicular en la Ciudad de México por día de la semana durante 2015.



**Figura 3.13.** Comparación del perfil promedio del tránsito vehicular en la Ciudad de México y su área metropolitana por día de la semana.



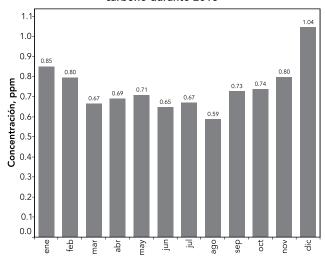
**Figura 3.14.** Serie de tiempo con la concentración promedio diaria del monóxido de carbono, el promedio (línea gris) se calculó para todas las estaciones de monitoreo de la Ciudad de México y su área metropolitana. La zona marcada en color gris corresponde a la desviación estándar.

En la serie de tiempo de la Figura 3.14 se observa el comportamiento del contaminante durante el año, los valores máximos se observaron en los meses de invierno, mientras que los mínimos en julio y agosto, que coinciden con las vacaciones de verano y la temporada de lluvia. Diciembre registró el promedio mensual máximo con un valor de 1.04 ppm, seguido del mes de enero con un promedio de 0.85 ppm (Figura 3.15). Agosto reportó la concentración promedio mensual mínima de 0.59 ppm. La concentración máxima registrada del promedio horario fue 7.8 ppm en la mañana del 23 de enero en la estación XAL, este valor es significativamente menor que el límite de la norma de 11 ppm para el promedio de 8 horas. El promedio de 8 horas máximo fue de 3.8 ppm (el valor de la NOM para este contaminante es de 11 ppm) y se registró el 24 de diciembre en la estación Iztacalco, ubicada en la delegación Iztacalco, en la Ciudad de México.

La concentración promedio anual de este contaminante durante 2015 fue de 0.74 ppm, el cual fue 5% mayor al registrado en 2014 (0.72 ppm). El promedio anual de los sitios ubicados en la Ciudad de México fue ligeramente mayor (0.75 ppm) que el calculado para los sitios ubicados en la zona conurbada del Estado de México (0.73 ppm). Sin embargo, el sitio Xalostoc (XAL), ubicado en Ecatepec de Morelos, Estado de México,

reportó un promedio anual máximo de 1.14 ppm. Las concentraciones máximas del contaminante se observaron en las estaciones ubicadas en las zonas de mayor tránsito vehicular, principalmente en la región central de la Ciudad de México (Figura 3.16). Las estaciones ubicadas al sur de la ciudad, en donde existe un menor tránsito vehicular, registraron los menores promedios anuales.

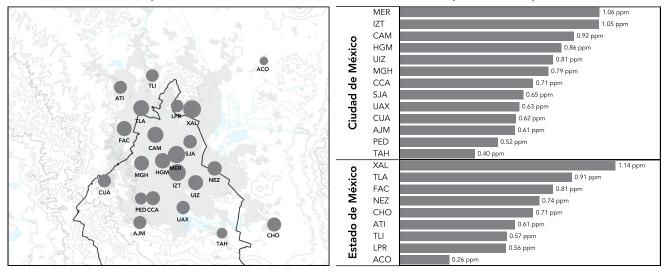
# Promedio mensual del monóxido de carbono durante 2015



**Figura 3.15.** Promedio mensual de la concentración de monóxido de carbono, el promedio se calculó con los datos de todas las estaciones de monitoreo.

#### Distribución espacial del CO en 2015

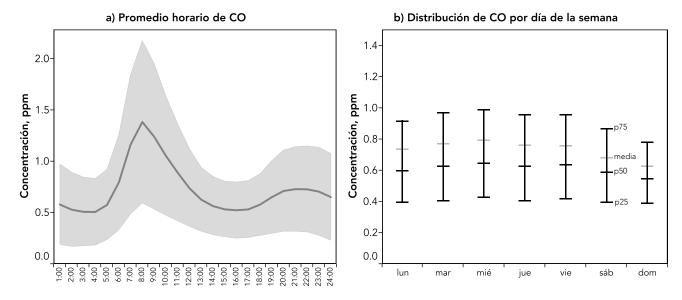
#### Valor del promedio anual por estación



**Figura 3.16.** Promedio anual de la concentración de monóxido de carbono por sitio de monitoreo, en el mapa de la izquierda el tamaño del círculo es proporcional al valor del promedio anual.

La Figura 3.17 presenta los gráficos de distribución por hora y día de la semana. Como ya se comentó, la concentración del contaminante durante el día presenta un comportamiento con dos picos máximos, el primero de mayor intensidad alrededor de las 8:00, el segundo entre las 20:00 y 23:00. De los días de las semana, el martes y miércoles reportaron las mayores concentraciones, este fenómeno es interesante ya que en años previos las mayores concentraciones se ob-

servaron en viernes. Este comportamiento es parecido al que se observó en los patrones de los óxidos de nitrógeno por día de la semana. De igual manera, en los promedios mensuales se observó un ligero incremento en comparación con los mismos meses durante 2014. Estos cambios en los patrones típicos de los contaminantes primarios, podrían tener una relación con los cambios realizados este año a los programas de Verificación Vehicular y Hoy No Circula.



**Figura 3.17.** Distribución de la concentración de monóxido de carbono durante 2015 por hora del día (a) y por día de la semana (b).

### Ozono

En las concentraciones atmosféricas típicas en ambientes urbanos el ozono es un gas incoloro. En el aire puro a concentraciones mayores a 20 ppb su olor puede ser perceptible. Es un gas que se encuentra de manera natural en la atmósfera, a la altitud de la Ciudad de México la concentración de fondo del ozono se encuentra entre 20 y 40 ppb, sin embargo, se han observado concentraciones que superan los 60 ppb. En ambientes urbanos se encuentra en concentraciones elevadas en el esmog fotoquímico y puede provocar daños en humanos, animales y plantas. El ozono no es un compuesto que se emite directamente a la atmósfera, se forma de reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles.

El ozono tiene efectos importantes en la salud. A concentraciones mayores a 150 ppb puede provocar dolor de cabeza, a más de 250 ppb puede provocar dolor de pecho, falta de respiración, tos y molestias para respirar. Una exposición mayor a 300 ppb durante una hora se asocia con una disminución en la función respiratoria (Jacobson, 2012). En el largo plazo, una exposición repetitiva a altas concentraciones podría provocar enfermedades respiratorias, el envejecimiento del tejido pulmonar, además de daños en los pulmones. Las personas de edad avanzada, enfermas, asmáticos, con bronquitis crónica, con enfisema y los niños, son los más susceptibles a los daños del ozono en el tracto respiratorio y pulmones . A concentraciones mayores a 100 ppb, el ozono afecta a los animales incrementando su susceptibilidad a infecciones bacterianas. También daña a la vegetación interfiriendo con su desarrollo y aumentando la susceptibilidad a enfermedades e infecciones. El ozono daña también algunos materiales como el caucho, tintas textiles, fibras, recubrimientos y pinturas.

Los procesos químicos que ocurren durante la formación del esmog fotoquímico son de una gran complejidad. Estos inician con la producción fotoquímica de radicales libres durante la mañana, seguida por la formación del dióxido de nitrógeno a través de la oxidación del óxido nítrico y de los compuestos orgánicos. La producción de ozono ocurre de la fotólisis del dióxido de ni-

trógeno en óxido nítrico (NO) y oxígeno reactivo (O), este último reacciona con el oxígeno molecular del aire (O<sub>2</sub>) para formar el ozono. El sol proporciona la energía necesaria para las reacciones fotoquímicas. La producción de ozono depende de la cantidad, proporción y composición de sus precursores, de la disponibilidad de radicales libres, la intensidad de la radiación solar, la temperatura y la estabilidad atmosférica.

La Ciudad de México es particularmente susceptible a la formación del esmog fotoquímico. Durante la mayor parte del año el viento predominante sopla desde el norte de la cuenca, arrastrando hacia la ciudad contaminantes que se generan en los grandes corredores industriales que se encuentran en la zona conurbada, y los contaminantes provenientes de los vehículos que se desplazan desde los alrededores hacia la ciudad. Las montañas que rodean la cuenca limitan la dispersión de los contaminantes, que se acumulan gradualmente al sur y poniente durante la mañana y las primeras horas de la tarde. Las montañas, además de limitar la dispersión, favorecen el desarrollo de inversiones térmicas de superficie o de subsidencia de escala local, principalmente durante la temporada seca (octubre a mayo). Por otra parte, la ciudad se encuentra a una latitud de 19°N, dentro de la zona intertropical, por lo tanto recibe una cantidad importante de radiación solar durante todo el año y con mayor intensidad en los meses de marzo a octubre. La duración del fotodía es de 11 horas en el invierno y 13 horas durante el verano. En la primavera, la región central del país se encuentra expuesta a la influencia de sistemas de alta presión que generan condiciones de cielo despejado, estabilidad atmosférica e intensa radiación solar, condiciones favo-rables para una intensa producción de ozono.

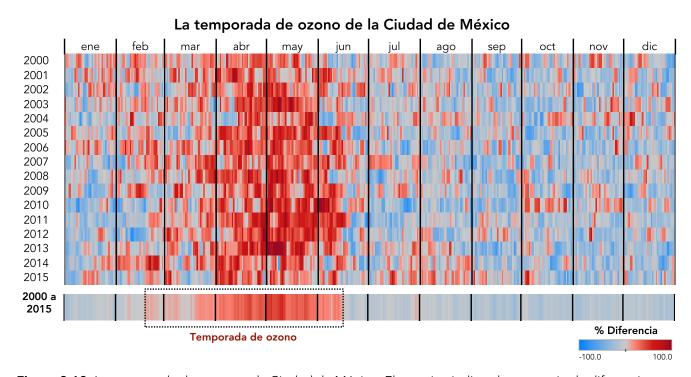
Las grandes campañas internacionales de monitoreo, realizadas en 2003 y 2006, pusieron en evidencia la complejidad de los procesos químicos involucrados en la formación del ozono en la atmósfera de la Ciudad de Méxio, así como la relevancia que tienen las características fisiográficas y meteorológicas propias de la cuenca. Esto hace que su control implique grandes retos para la gestión ambiental.

En la región en donde se asienta la Ciudad de México se ha identificado que durante la temporada seca-caliente las condiciones meteorológicas son favorables para la formación y acumulación del esmog fotoquímico. Este periodo se caracteriza por la presencia de sistemas de alta presión que afectan directamente la región central del país, favoreciendo cielos despejados y estabilidad atmosférica. La ausencia de nubosidad durante los meses en los que la radiación alcanza su máxima intensidad, proporciona cantidades importantes de energía para la actividad fotoquímica. Por otra parte, las inversiones térmicas de subsidencia son frecuentes y pueden permanecer durante varias horas o días, provocando condiciones de estabilidad sobre la cuenca que permiten la acumulación de la contaminación. Este tipo de episodios pueden provocar un severo deterioro en la calidad del aire por la formación del esmog fotoquímico. Para propósitos de la gestión ambiental esta temporada de ozono inicia durante la segunda semana de febrero y concluye con el inicio de la temporada de lluvia en junio (Figura 3.18).

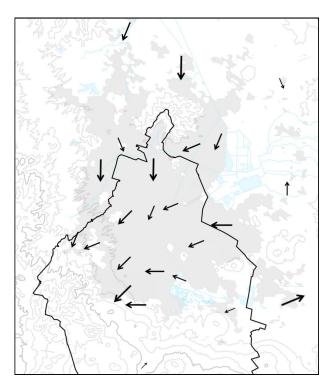
En 2015 la temporada de ozono fue de inten-

sidad moderada debido a la presencia de lluvias atípicas en los meses de marzo a mayo. Durante un episodio de lluvia, la actividad convectiva de la atmósfera, que favorece la formación de nubosidad y lluvia, contribuye a la inestabilidad atmosférica en la región baja de la atmósfera, provocando condiciones favorables para la dispersión de la contaminación. La humedad del ambiente y la precipitación favorecen la deposición húmeda de los contaminantes.

El análisis del campo de vientos durante el periodo diurno (8:00-18:00) de la temporada de ozono indicó que el flujo predominante fue desde el norte de la ciudad (Figura 3.19), con una velocidad promedio de 1.5 m/s durante la mañana. Este patrón de viento es responsable del arrastre de los precursores de ozono desde la zona de máxima generación de emisiones, hacia el centro y sur de Ciudad de México. La baja velocidad del viento en la mañana contribuye a un mezclado relativamente uniforme de la masa de aire, baja turbulencia y escasa dispersión. El arrastre hacia el suroeste indica que fue la zona más afectada por ozono y otros contaminantes secundarios.



**Figura 3.18.** La temporada de ozono en la Ciudad de México. El mosaico indica el porcentaje de diferencia entre el promedio diario con respecto al promedio anual, los días en rojo indican valores mayores al promedio anual, mientras que los días en azul indican promedios diarios menores, entre más intenso es el color, mayor es la diferencia. La sección inferior muestra las diferencias promedio para el periodo 2000 a 2015 y en ella se define con claridad la temporada de ozono.



**Figura 3.19.** Vectores predominantes del flujo de viento durante la temporada de ozono. Los vectores se calcularon usando los datos del 15 de febrero al 15 de junio, para el periodo de 8:00 a 18:00.

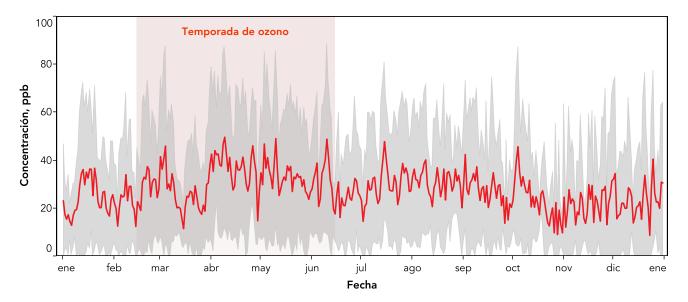
El promedio anual del contaminante calculado a partir de los valores horarios de todas las estaciones fue de 29.5 ppb. La concentración máxima del contaminante durante 2015 fue de 179 ppb y se observó el 30 de junio en el sitio de monitoreo Pedregal (PED), ubicado en la delegación Alvaro Obregón. En la Figura 3.20 se presenta la serie de tiempo para la concentración promedio diaria del contaminante, en donde se resalta la temporada de ozono. Como se puede observar, en marzo las concentraciones disminuyeron significativamente por la presencia de lluvias vespertinas durante la mayor parte de los días del mes. En abril y mayo también se presentaron algunos episodios de lluvia, pero en menor frecuencia e intensidad que en marzo. En comparación con los años previos, las concentraciones de ozono disminuyeron significativamente durante la temporada.

La radiación con longitud de onda menor a 400 nm interviene en la formación fotoquímica del ozono, en la Figura 3.21 se presenta la relación que se observó entre la producción de ozono y la intensidad de la radiación UV-A (320-400 nm), los mayores promedios se observan cuando la inten-

sidad de la radiación fue mayor, una disminución en la intensidad favoreció una menor producción.

El ozono requiere de la luz solar para su formación, por lo tanto los valores máximos siempre se presentan durante el día (Figura 3.22). En la noche se observa la presencia de ozono de fondo, que tiene contribuciones de origen natural y del remanente de la producción diurna del día previo. Se ha observado que la concentración del ozono de fondo es mayor en las estaciones que se encuentran en la periferia de la zona urbana o a mayor altitud. En los alrededores de la zona urbana se observa un menor agotamiento del ozono remanente por la baja concentración de especies que reacciona con él, mientras que las zonas que se encuentran a mayor altitud generalmente tienen una mayor contribución de ozono de origen natural y una menor concentración de sustancias agotadoras del ozono. Alrededor de las 7:00 se registran los valores mínimos, esto se debe a la titulación del ozono de fondo por las emisiones frescas de óxidos de nitrógeno que se producen durante la mañana. A partir de las 8:00, con el inicio de la actividad fotoguímica, la concentración incrementa gradualmente hasta alcanzar valores máximos entre las 14:00 y 16:00 horas. Con el descenso del sol por la tarde, disminuye la concentración de ozono al disminuir la intensidad de la radiación solar.

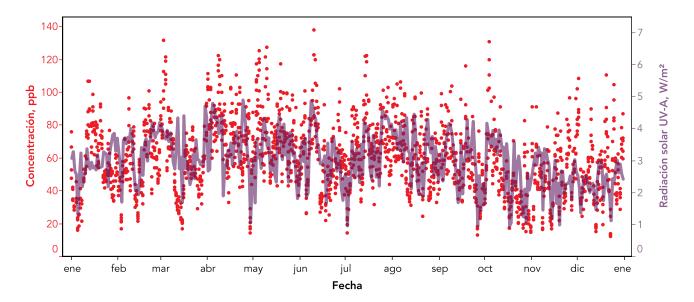
Debido a su origen secundario, el comportamiento del ozono puede presentar variaciones durante los días de la semana, esto en función de la concentración de sus precursores y su proporción. En la Figura 3.22 se presenta la distribución de los promedios horarios por día de las semana, en la Figura 3.23 se muestra la distribución de las concentraciones máximas por día de la semana. La interpretación de los datos presentados en ambos gráficos indica que los mayores niveles de contaminación por ozono en 2015 ocurrieron en miércoles y domingo. Del análisis de la distribución de los datos de monóxido de carbono y de óxidos de nitrógeno se observó que el día miércoles se registraron las concentraciones máximas de ambos contaminantes. El incremento en la concentración de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno también observada en miércoles sugiere que el aumento en la emisión de precursores contribuyó al incremento en la concentración de ozono. Por otra parte, el aumento de



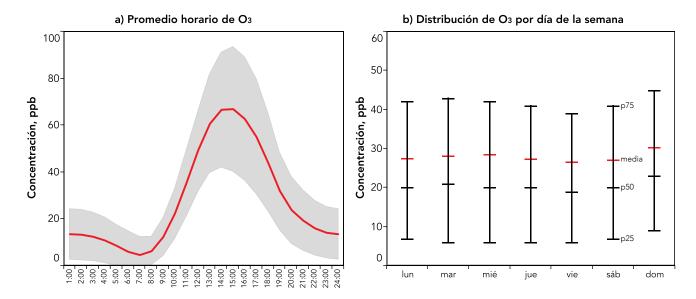
**Figura 3.20.** Serie de tiempo con la concentración promedio diaria de ozono. El promedio (línea roja) se calculó para todas las estaciones de monitoreo de la Ciudad de México y su área metropolitana. La zona marcada en color gris indica la desviación estándar. En el gráfico se destaca el periodo correspondiente a la temporada de ozono.

la concentración observada el día domingo tiene que ver principalmente con el efecto de fin de semana, el cual se presenta cuando, en un régimen sensible a compuestos orgánicos volátiles la concentración de óxidos de nitrógeno disminuye en mayor proporción que la concentración de compuestos orgánicos volátiles. Este cambio puede provocar un incremento en la concen-

tración de ozono con respecto a los días laborables. Por otra parte, una reducción en la concentración de óxidos de nitrógeno durante la mañana, disminuye también la disponibilidad de óxido nítrico para la titulación del ozono, provocando que durante la mañana las concentraciones de ozono se incrementen con mayor rapidez que durante el resto de los días de la semana.

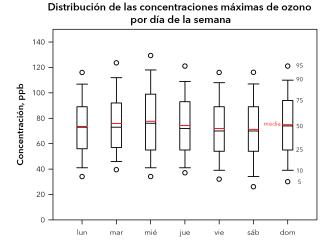


**Figura 3.21.** Comparación entre el promedio de la concentración de ozono y la intensidad de la radiación solar ultravioleta A (320-400 nm), entre las 12:00 y 17:00 horas. En el gráfico se puede observar la correspondencia que hubo entre la radiación solar y la concentración de ozono.

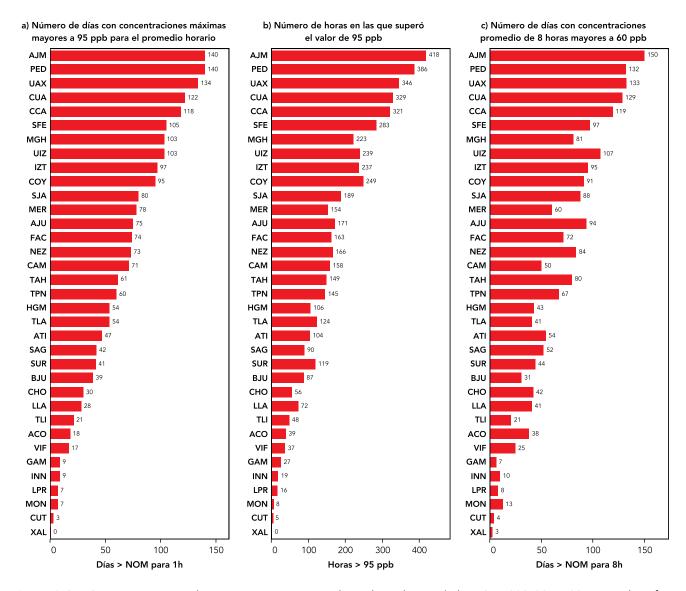


**Figura 3.22.** Distribución de los datos de ozono por hora y día de la semana. a) Perfil de la concentración horaria, la línea roja corresponde al promedio, la zona en gris indica la desviación estándar. b) Distribución de los datos por ozono por día de la semana, en el gráfico se indican los percentiles 25, 50 y 75, así como el promedio.

En la Ciudad de México y su área metropolitana se registraron 212 días en los que la concentración máxima superó el valor límite de la NOM-020-SSA1-2014 para el promedio de 1 hora (95 ppb), mientras que el valor promedio de 8 horas de 70 ppb se superó en 197 días. El mayor número de días en los que superó el valor de la norma se presentó durante la temporada de ozono. Durante 2015 ninguna estación logró cumplir con las recomendaciones de la norma. De manera desagregada se observó que la estación Ajusco Medio (AJM), en la delegación Tlalpan al suroeste de la Ciudad de México, registró el mayor número de días en los que el valor máximo superó el valor de la norma de 95 ppb, con un total de 140 días y 418 horas; seguida por la estación Pedregal (PED), en la delegación Alvaro Obregón, con 140 días y 386 horas. Para el promedio de 8 horas, las estaciones de Ajusco Medio y UAM-Xochimilco (UAX), esta última ubicada en el límite entre las delegaciones Coyoacán y Xochimilco, se superó en 150 y 133 días, respectivamente. Las estaciones con el menor número de días que rebasaron los valores límite fueron Xalostoc (XAL) y Cuautitlán (CUT), ambas ubicadas al norte de la ciudad en la zona conurbada del Estado de México. En la Figura 3.24 se presentan el número de días y horas en los que se superó el valor límite para el promedio de 1 hora, así como el número de días en los que se superó el valor límite para el promedio de 8 horas. Es importante mencionar que en el análisis de los datos 2015 se aplicó la última revisión de la norma para ozono, que redujo los límites permisibles para los promedios de 1 y 8 horas. Es por esto que al comparar con años previos, se podría pensar que la concentración de ozono se incrementó notablemente, sin embargo, en términos estadísticos las concentraciones en 2015 fueron menores que las reportadas en 2014.



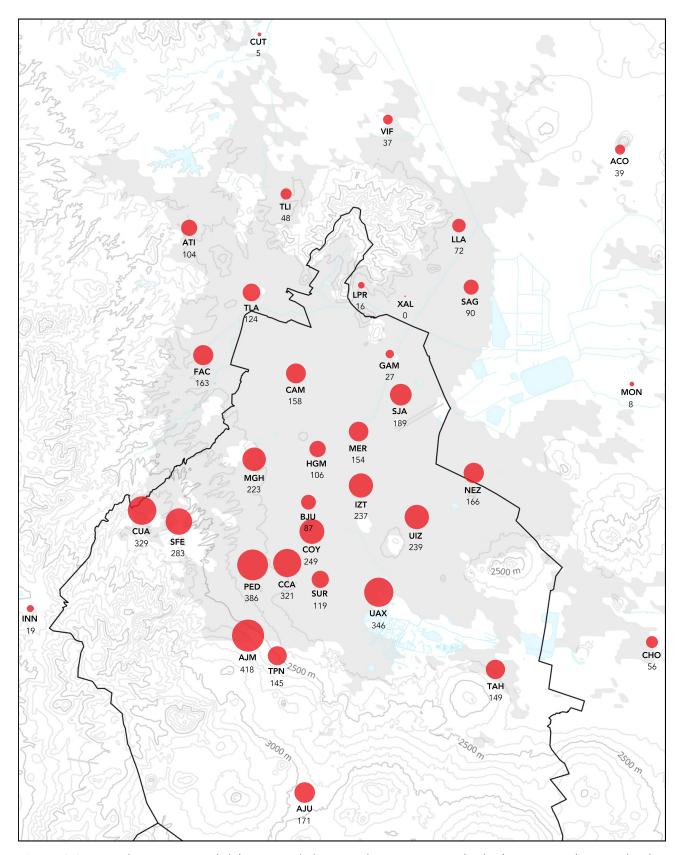
**Figura 3.23.** Distribución de los valores máximos registrados entre las 13:00-18:00 durante los meses de marzo a junio (temporada de ozono).



**Figura 3.24.** Concentraciones de ozono con respecto a los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014. En el gráfico a) se indica el número de días en los que superó la concentración de ozono para el promedio de 1 hora (95 ppb), en la gráfica b) se indica el número total de horas que se superó el valor límite de la NOM, en la gráfica c) se indica el número de días en los que se superó el valor del promedio de 8 horas (70 ppb).

El análisis espacial del número de horas en las que se superó el valor límite de la norma para el promedio de 1 hora, demostró que las demarcaciones ubicadas al sur de la Ciudad de México, principalmente en la zona de piedemonte y las laderas de la sierra del Ajusco-Chichinautzin, fueron las más afectadas por los altos niveles de ozono. La combinación de los vientos predominantes durante la temporada de ozono (Figura 3.19), junto con las características fisiográficas de la cuenca, contribuyeron a que el suroeste fuera la zona con el mayor número de horas sobre la norma. En la Figura 3.25 se presenta el número de

horas en las que se superó el valor límite de la norma para el promedio de 1 hora, en el mapa se incluyen todas las estaciones, incluso aquellas que tuvieron menos del 75% de datos válidos, ya que la norma específica que para su evaluación no es necesario que la estación cumpla con más del 75% de los datos, siempre y cuando la concentración supere el valor límite. En el mapa es evidente el hecho de que las máximas concentraciones se presenten viento abajo de las zonas de máxima emisión. Por otra parte, las estaciones ubicadas en la región periurbana reportaron un menor número de horas que superaron la norma.



**Figura 3.25.** Distribución espacial del número de horas en las que superó el valor límite para el promedio de 1 hora en la Ciudad de México y su área metropolitana. El mapa considera todas las estaciones sin importar si cuentan con menos del 75% de datos válidos.

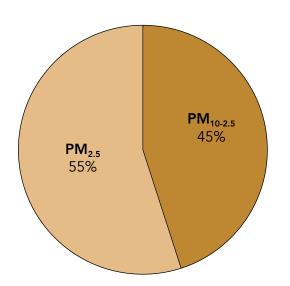
# Partículas suspendidas

La presencia de concentraciones elevadas de partículas suspendidas en el aire ambiente tiene un riesgo importante para la salud humana, la visibilidad y el cambio climático global (Jacobson, 2012). Varios estudios alrededor del mundo han demostrado la relación directa que existe entre el incremento en la concentración de las partículas suspendidas y el aumento de problemas respiratorios e incluso con la mortalidad (Dockery, 1992; Pope, 2000). Las partículas contienen una gran variedad de sustancias peligrosas, tanto orgánicas como inorgánicas. No todas las partículas en suspensión ingresan al sistema respiratorio, solo aquellas menores a 10 μm (1μm=10-6 m) son capaces de ingresar de manera significativa al tracto respiratorio. El tamaño de la partícula determina la zona en donde se depositará dentro del sistema respiratorio, las más grandes se retienen en la región superior, mientras que las menores (<1 μm) pueden alcanzar la región alveolar.

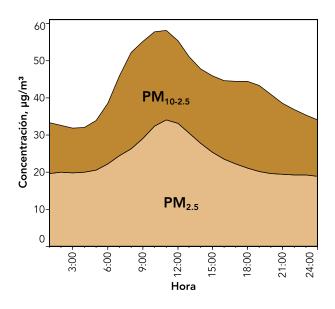
En la Ciudad de México se miden de manera continua tres fracciones de partículas suspendidas: partículas menores a  $10 \, \mu m$  (PM<sub>10</sub>), partículas menores a  $2.5 \, \mu m$  (PM<sub>2.5</sub>), también conocidas como partículas finas, y la fracción gruesa referida como la diferencia entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (PM<sub>10-2.5</sub>). También se colectan muestras de partículas sus-

pendidas totales (PST),  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  con muestreadores manuales de referencia para diferentes propósitos: comparación con los métodos continuos, evaluación de la NOM y recientemente para el análisis de la composición elemental. Estas muestras se colectan una vez cada seis días.

La fracción de PM<sub>10</sub> representa la suma de las fracciones fina y gruesa. En la Ciudad de México, alrededor del 55% de la masa de PM<sub>10</sub> corresponde a  $PM_{2.5}$  (Figura 3.26), el resto a  $PM_{10-2.5}$ . La composición de la fracción fina está dominada por materiales de origen secundario (sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos secundarios), mientras que la fracción gruesa contiene principalmente materiales de tipo primario (polvo resuspendido). La proporción entre las fracciones gruesa y fina no es constante y varía a lo largo del día. En términos generales durante las horas de la mayor intensidad en el tránsito vehicular, la proporción de las partículas gruesas con respecto a las finas puede representar entre el 50 y 60% de la masa total de  $PM_{10}$ , sin embargo, durante el resto del día la fracción fina domina la composición de la masa de PM<sub>10</sub>, con más del 50% de la masa total de PM<sub>10</sub> (Figura 3.27). La proporción puede variar dependiendo de la cercanía del sitio a las vialidades y de la época del año.



**Figura 3.26.** Contribución de las fracciones  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  a la masa total de  $PM_{10}$ .



**Figura 3.27.** Variabilidad horaria promedio de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10\cdot2.5}$ .

El predominio de las partículas finas, formadas principalmente con compuestos de origen secundario, tiene implicaciones importantes en términos de los impactos a la salud, el deterioro de la visibilidad, además de contribuciones a la modificación del clima local y global.

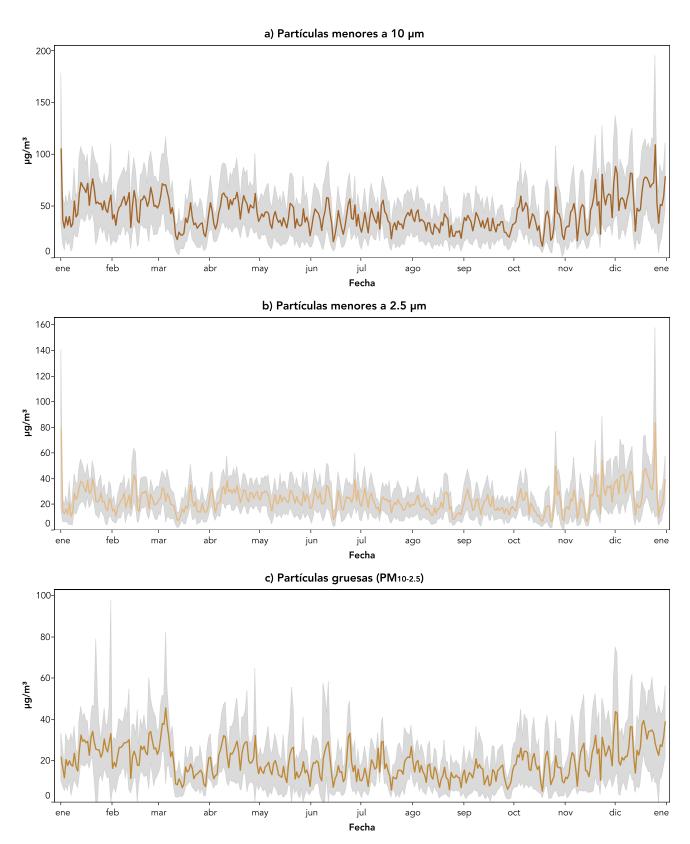
Históricamente en el monitoreo de partículas suspendidas se ha dado prioridad a la medición en el territorio de la Ciudad de México, sin embargo, se ha observado que las mayores concentraciones se registran generalmente en el área conurbada del Estado de México, por lo que en los siguientes años se dará prioridad al reforzamiento del monitoreo en esa región. Durante 2015, el monitoreo de partículas suspendidas fue uno de los más afectados por la reducción en el suministro de refacciones y consumibles debido a la devaluación del peso frente al dólar. Lo anterior tuvo como consecuencia que algunos instrumentos estuvieran fuera de operación temporalmente. Sin embargo, con el propósito de asegurar la información para la protección a la salud se dio prioridad al monitoreo durante los periodos de máxima concentración de partículas. En el caso de la estación de monitoreo XAL, ubicada en la zona industrial de Xalostoc, en Ecatepec de Morelos, es importante mencionar que la construcción de la Ruta 2 del Mexibus sobre la Vía Morelos, a menos de 100 metros de la estación de monitoreo, provocó interferencias en las mediciones del contaminante por el movimiento de materiales, presencia de maquinaria y el agravamiento del tránsito local inducido por el restricción en la circulación. Esta situación comprometió la representatividad de las mediciones de este contaminante, puesto que tenía un impacto estrictamente local. Con la conclusión de las obras principales, a partir de la segunda semana de abril se validaron las mediciones en la zona.

En la Figura 3.28 se presenta la serie de tiempo para los promedios diarios de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$ . Como cada año, los meses de la temporada invernal reportaron los valores máximos en las tres fracciones, mientras que durante la temporada de lluvia las concentraciones fueron menores. El valor máximo para el promedio de 24 horas de  $PM_{10}$  se observó en el sitio Villa de las Flores (VIF), en el municipio de Coacalco, Estado de México, con una concentración de 224  $\mu$ g/m³ el día 25 de diciembre. En el caso de  $PM_{2.5}$  la concentración

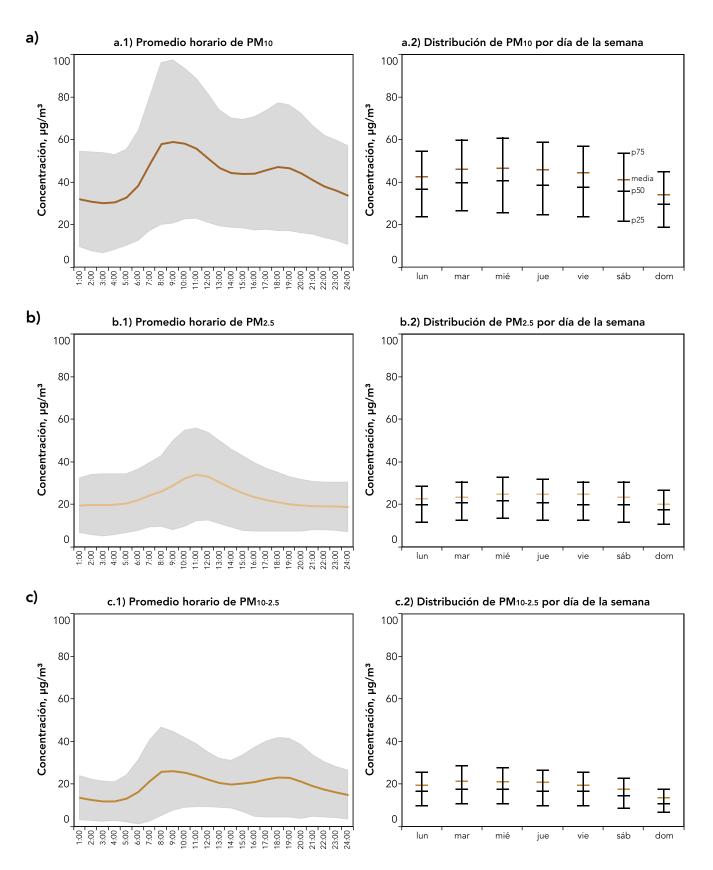
máxima se registró en la estación Benito Juárez (BJU), ubicada en la delegación con el mismo nombre, con una concentración de 124 μg/m³ el 25 de diciembre. En el caso de PM<sub>10-2.5</sub>, la estación Xalostoc (XAL), en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México, registró el promedio máximo con una concentración de 103 μg/m³ el día 1 de diciembre. Los promedios anuales para las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10-2.5</sub> fueron 43, 23.6 y 19.7 μg/m³, respectivamente.

Durante diciembre se registraron los promedios mensuales máximos con concentraciones para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  de 63, 34.5 y 29  $\mu$ g/m³, respectivamente. Durante marzo se observó un decremento importante en la concentración de todas las fracciones de partículas suspendidas, provocado por las lluvias atípicas que se presentaron ese mes.

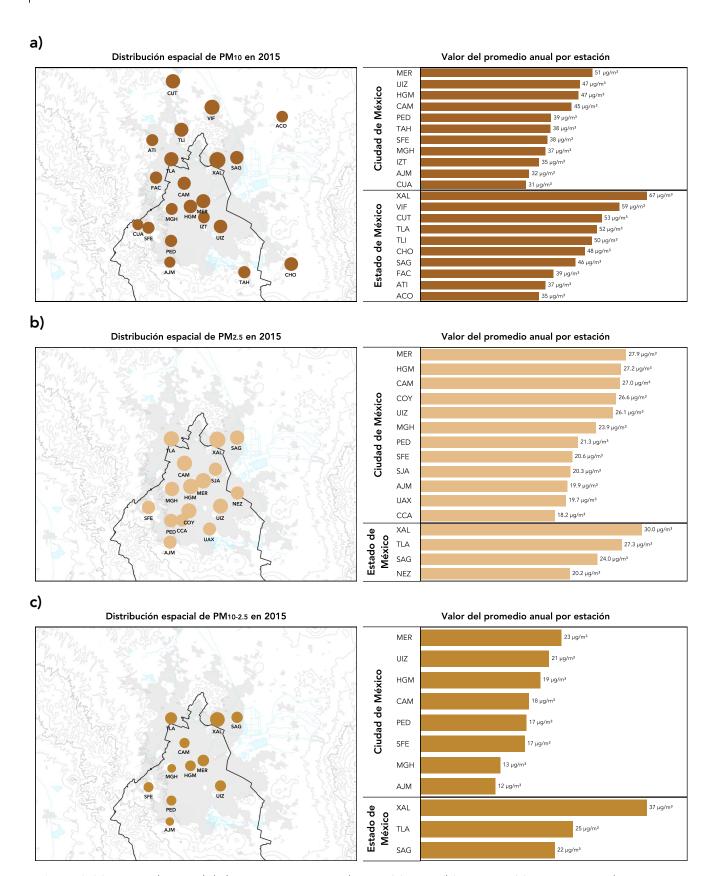
El perfil promedio horario de la concentración de PM<sub>10</sub> presenta una distribución bimodal durante el día, con un pico matutino entre las 8:00 y las 11:00, y uno vespertino, de menor intensidad, entre las 18:00 y 20:00 (Figura 3.29). Este comportamiento se observó también en la fracción PM<sub>10-2.5</sub>, y está relacionado con las emisiones de la actividad vehicular en la ciudad. La mayor parte de las partículas con diámetros mayores a 2.5 µm se originan en la resuspensión del polvo del suelo, por el paso de los automóviles. Esta contribución será mayor en las zonas en donde hay actividad vehicular intensa. En las estaciones de monitoreo ubicadas en la zona conurbada, los máximos diurno y vespertino son evidentes y pueden ser de magnitudes similares, mientras que en las estaciones de monitoreo localizadas en la Ciudad de México se distingue el pico matutino, pero el pico vespertino es significativamente menor. Además, el pico matutino generalmente tiene un desfase de 1 a 3 horas con respecto a las estaciones ubicadas en la zona conurbada. Lo anterior se puede explicar por la diferencia en los patrones del tránsito entre ambas zonas. Por otra parte, la concentración de PM<sub>25</sub> exhibe un pico de concentración centrado alrededor de las 11:00 de la mañana. Este incremento está asociado directamente con la formación de aerosoles secundarios a partir de la oxidación de los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, para formar nitratos y sulfatos, respectivamente. Además de la contribución de aerosoles orgánicos secundarios.



**Figura 3.28.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{10}$  (a),  $PM_{2.5}$  (b) y  $PM_{10-2.5}$  (c) durante 2015. La líneas continuas corresponden a los promedios calculados a partir de los datos de todas las estaciones de monitoreo, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.



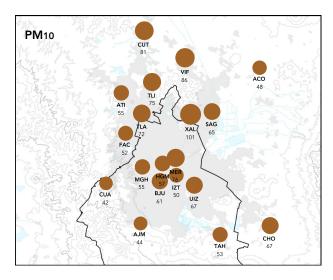
**Figura 3.29.** Distribución por hora (izquierda) y día de la semana (derecha) de las concentraciones horarias de  $PM_{10}$  (a),  $PM_{2.5}$  (b), y  $PM_{10-2.5}$  (c).

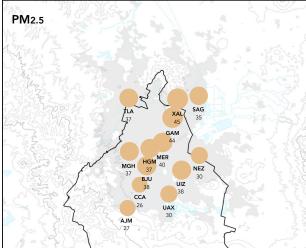


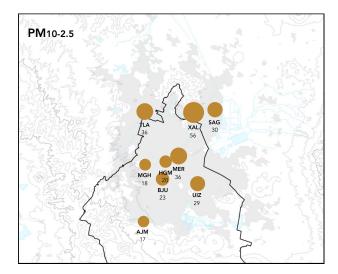
**Figura 3.30.** Promedio anual de las concentraciones de  $PM_{10}$  (a),  $PM_{2.5}$  (b), y  $PM_{10-2.5}$  (c), por estación de monitoreo En los mapas de la izquierda el tamaño del círculo es proporcional al valor del promedio anual. En los gráficos se emplearon los sitios con más del 60% de datos válidos.

En términos espaciales, en la distribución de la concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>10-2.5</sub> se observó un gradiente con concentraciones máximas en el norte que disminuyen hacia el sur. Históricamente las concentraciones máximas se han registrado en estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana, esto por las contribuciones del polvo resuspendido proveniente de las zonas agrícolas del norte, por la industria abundante en esa región y el intenso tránsito vehicular. Durante la temporada seca son frecuentes las tolvaneras en las estaciones ubicadas cercanas a los terrenos de uso agrícola. Dentro del territorio de la Ciudad de México la estación Merced (MER), en la delegación Venustiano Carranza, reportó el promedio anual máximo con concentraciones anuales para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  de 51.0, 27.9, y 22.9  $\mu$ g/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Al igual que en caso de ozono, se ha identificado una temporada del año en la cual se observa un incremento importante en las concentraciones de partículas suspendidas y que ha denominado temporada de partículas. Se presenta generalmente durante los meses de la temporada secafría (desde noviembre hasta mediados de febrero), meteorológicamente se caracteriza por una disminución en la temperatura y la humedad, ausencia de lluvia, disminución en la intensidad solar y un incremento en la frecuencia y duración de los episodios de inversión térmica en la cuenca. Adicionalmente, los niveles de contaminación por partículas suspendidas, tanto PM<sub>10</sub> como PM<sub>2.5</sub>, se incrementan significativamente durante diciembre por las celebraciones propias de la temporada, el aumento en la actividad vehicular y el uso de juegos de pirotecnia. En la Figura 3.31 se muestran los promedios mensuales para las diferentes fracciones de partículas durante diciembre. Es en este mes cuando se registra el mayor número de episodios con concentraciones que superan los valores límite de la norma para el promedio de 24 horas, que incluso pueden alcanzar concentraciones que activan el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas, principalmente en los días de Navidad y Año Nuevo por la quema de juegos de pirotecnia y de fogatas. En 2015 se activó la Fase de Precontingencia del PCAA el 25 de diciembre, cuando el promedio de 24 horas superó los 150 puntos en el índice de calidad del aire.





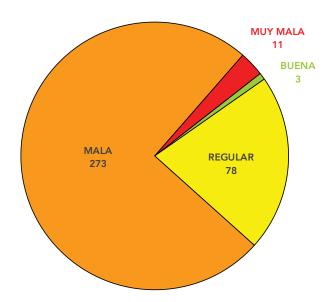


**Figura 3.31.** Durante diciembre ocurren las mayores concentraciones de partículas suspendidas en la Ciudad de México y su área metropolitana. En la figura se muestran los promedios de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10.2.5}$  por estación durante el mes.

# Índice de calidad del aire

En la Ciudad de México se utiliza un índice para difundir el estado de la calidad del aire a la población y su asociación con los efectos en la salud. Este índice se conoce como Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). El índice tiene la intención de comunicar de manera simple el nivel máximo de contaminación y su riesgo. Emplea una escala que va de 0 para el aire libre de contaminantes a 500 para un aire con un deterioro grave por la contaminación.

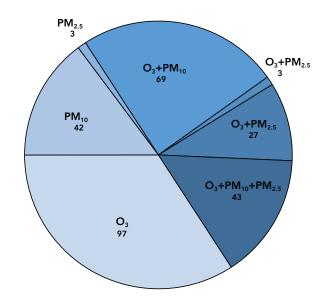
El valor de 50 del IMECA se asigna a la concentración límite de la NOM para la exposición crónica, mientras que el valor de 100 se asigna al valor límite para exposición aguda. Carece de unidades pero es común referirse a los valores del índice como "puntos" o "puntos IMECA". La escala se divide en categorías y a cada una de ellas se le asigna un color. El intervalo de 0 a 50 indica una calidad del aire BUENA (verde), de 51 a 100 REGULAR (amarillo), de 101 a 150 MALA (anaranjado), de 151 a 200 MUY MALA (rojo) y más de 201 corresponde a una calidad del aire EXTREMADA-MENTE MALA (morado). Se considera que un día registra una MALA calidad del aire, cuando cualquiera de los contaminantes medidos supera el valor de 100 puntos en el índice.



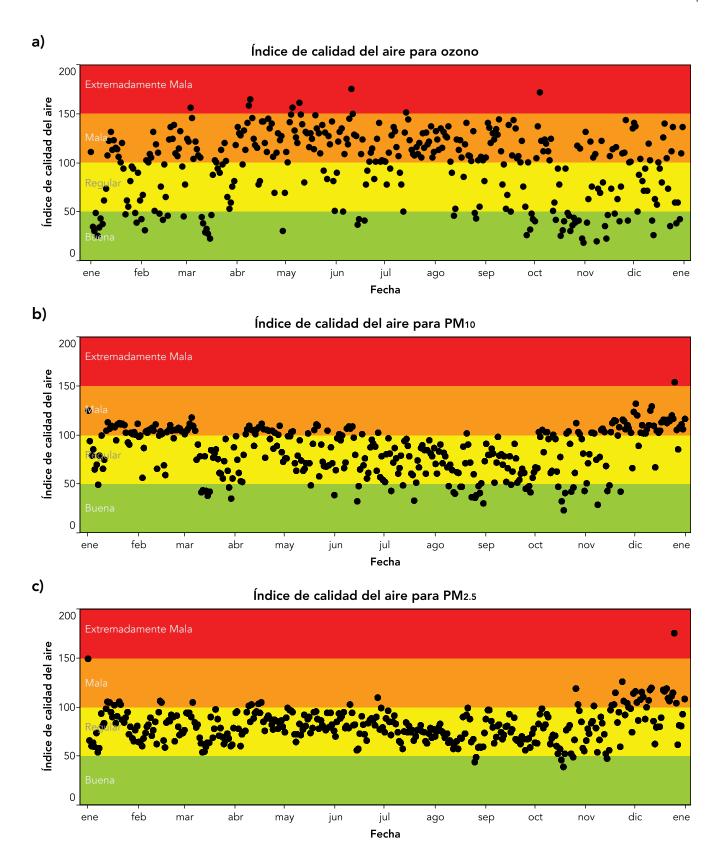
**Figura 3.32.** Número de días por categoría de calidad del aire. El gráfico incluye a todos los contaminantes del aire y todas las estaciones ubicadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México

En 2015 se incrementó el número de días con una MALA calidad del aire con respecto al año previo, sin embargo, es importante recordar que esto se asocia también con la reducción en los valores límite de las NOM de ozono y partículas. En la Figura 3.32 se indica el número de días por categoría de calidad del aire en la zona metropolitana, en total se registraron 81 días (22%) en los que se cumplió la NOM. El ozono, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> continúan como los responsables del deterioro de la calidad del aire. Al desagregar por contaminante se observó que para ozono se registraron 153 días (42%) con concentraciones que cumplen con la norma, para PM<sub>10</sub> se registraron 184 días (50%) y para PM<sub>2.5</sub> 289 días (79%).

En un día con MALA o MUY MALA calidad del aire puede ocurrir que más de un contaminante supere el valor límite de la NOM (Figura 3.33). En aquellos días en los que se excede la norma para dos o más contaminantes, podría presentarse un efecto sinérgico con un riesgo mayor para la salud, durante 2015 en 142 días reportaron MALA calidad del aire para más de un contaminante. En los gráficos de la Figura 3.34 se presentan las series de tiempo con las concentraciones máximas con respecto a las categorías del índice.



**Figura 3.33.** Número de días con MALA calidad del aire por contaminante. Durante un porcentaje importante de días del año se presentaron valores mayores a la NOM para más de un contaminante.



**Figura 3.34.** Índice de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana para ozono (a), PM<sub>10</sub> (b) y PM<sub>2.5</sub> (c). Los gráficos muestran los valores máximos del índice para cada día, los colores del fondo corresponden a las diferentes categorías de calidad del aire del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

## **Tendencias**

El objetivo más importante de la gestión de la calidad del aire consiste en lograr una reducción en los niveles de contaminación que permita alcanzar los límites seguros para la protección de la salud, ésto a través del diseño de políticas efectivas para el control de las emisiones, sin comprometer la funcionalidad de una ciudad. El reto es mayor para la Ciudad de México debido a sus características naturales que contribuyen a exacerbar el problema de contaminación.

En la década de los noventa con la publicación del Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, conocido como PICCA, se marcó el inicio de la gestión de la calidad del aire con un enfoque transversal y sistemático, que incluía acciones para el control de la contaminación de corto, mediano y largo plazo. Los resultados del programa se observaron en los primeros cinco años al reducir drásticamente las concentraciones de la mayoría de los contaminantes. El PICCA fue precedido por el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México (mejor conocido como PROAIRE), que actualmente ya se encuentra en su tercera versión (con una vigencia de 2011 a 2020). En términos generales estos programas han logrado reducir la contaminación de manera efectiva, esto se ha logrado a través de una visión integral del problema ambiental y con la participación directa de los diferentes niveles de gobierno. Los programas proponen acciones con metas de corto, mediano y largo plazos. El último PROAIRE, elaborado durante la anterior administración, abordó por primera vez el problema desde un punto de vista ecosistémico, e incluye ocho estrategias que se ejecutarán a través de 108 acciones. Cinco de las estrategias tienen como meta la reducción de la emisión de contaminantes.

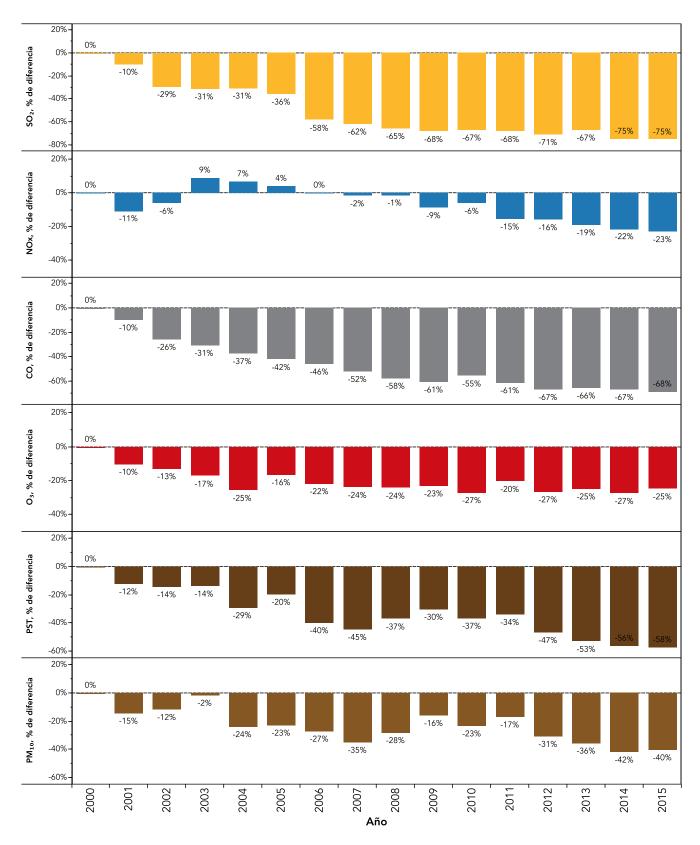
El avance en la reducción de la contaminación desde la década de 1990 es evidente, principalmente en los contaminantes de origen primario, en donde se han logrado disminuciones de hasta el 90%. El progreso en la mejora de la calidad del aire se puede observar en las Figuras 3.36 a 3.43 en donde se presentan las series de tiempo de los promedios mensuales durante el periodo

comprendido entre 1986 y 2015, para cada uno de los contaminantes criterio. En todos los contaminantes se observa una tendencia descendente desde 1995, sin embargo, en los últimos años ha disminuido la tasa de descenso y en algunos casos podría considerarse que se ha alcanzado una condición de estabilidad.

En la Figura 3.35 se presenta el porcentaje anual de reducción en los últimos 15 años con respecto al promedio anual del año 2000. En el gráfico un valor negativo indica una reducción con respecto al año base, mientras que un número positivo indica un incremento con respecto al año base. Se puede observar una disminución importante en los contaminantes primarios como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y PM<sub>10</sub>, sin embargo, en los contaminantes secundarios como el ozono y las PM<sub>2.5</sub> (que tienen una contribución secundaria importante) la disminución ha sido significativamente menor. Desde 2014 no se han observado cambios importantes en los promedios anuales de los contaminantes.

El hecho de que no existan cambios significativos en los niveles de contaminación en los últimos años podría indicar una condición de equilibrio entre las acciones de control y el volumen de emisiones. El crecimiento continuo de la zona metropolitana, principalmente en la zona conurbada del Estado de México, mantiene una demanda creciente de energía, transporte, servicios y fuentes de empleo. Lo anterior tiene como consecuencia también un incremento en la generación de contaminantes.

En este contexto, el reto actual de la gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana, consiste en diseñar e implementar una nueva generación de políticas ambientales enfocadas principalmente al control de los precursores de los contaminantes secundarios. Estas deben contar con un sólido fundamento científico, ser técnicamente viables, y con un costo económico, social y político mínimo que permita su implementación en los diferentes sectores responsables de la emisión. Por otra parte, de no aplicar nuevas políticas de control o reforzar las acciones vigentes, existe el riesgo de que en el futuro inmediato las tendencias se reviertan.



**Figura 3.35.** Porcentaje de diferencia del promedio anual con respecto al promedio anual del año 2000 para cada uno de los principales contaminantes del aire. No se muestra  $PM_{2.5}$  ya que su medición inició en agosto de 2003.

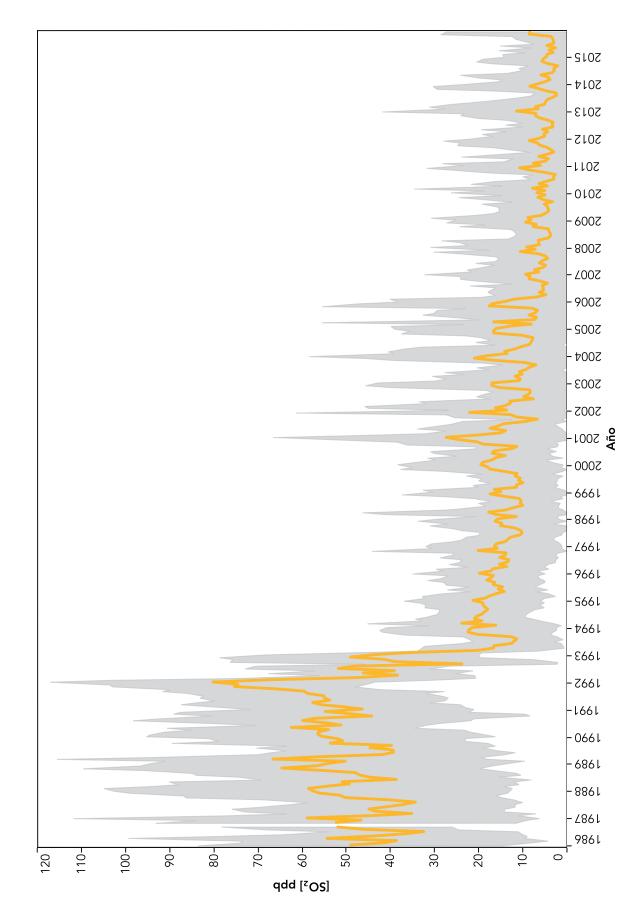


Figura 3.36. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de dióxido de azufre para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2015. La línea amarilla corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

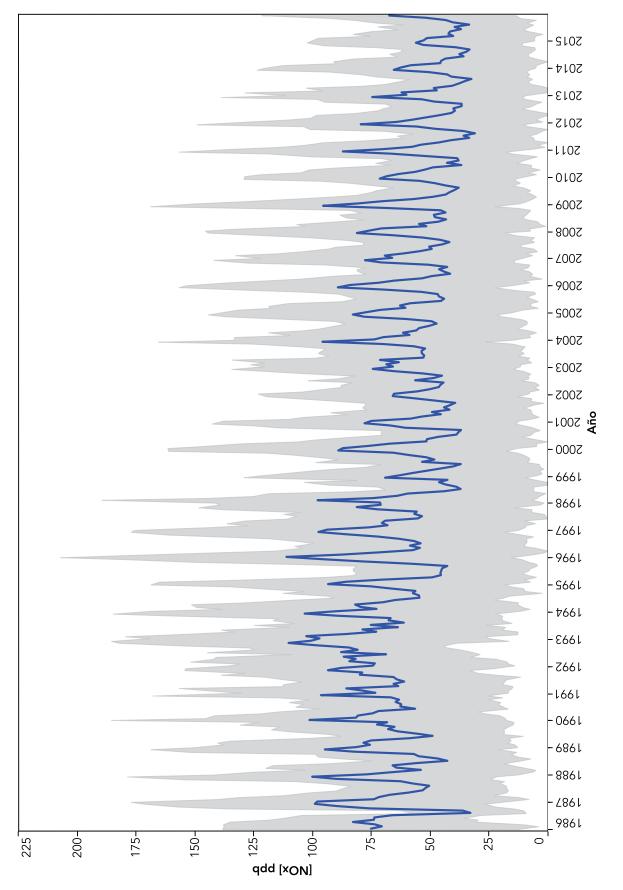


Figura 3.37. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de óxidos de nitrógeno para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2015. La línea azul corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

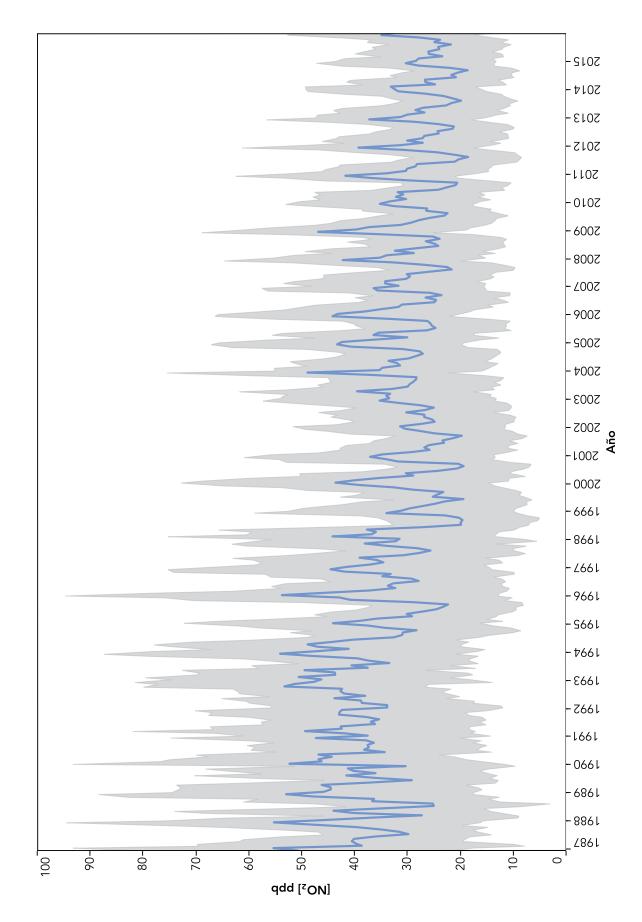


Figura 3.38. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de dióxido de nitrógeno para el periodo de enero de 1987 a diciembre de 2015. La línea azul corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

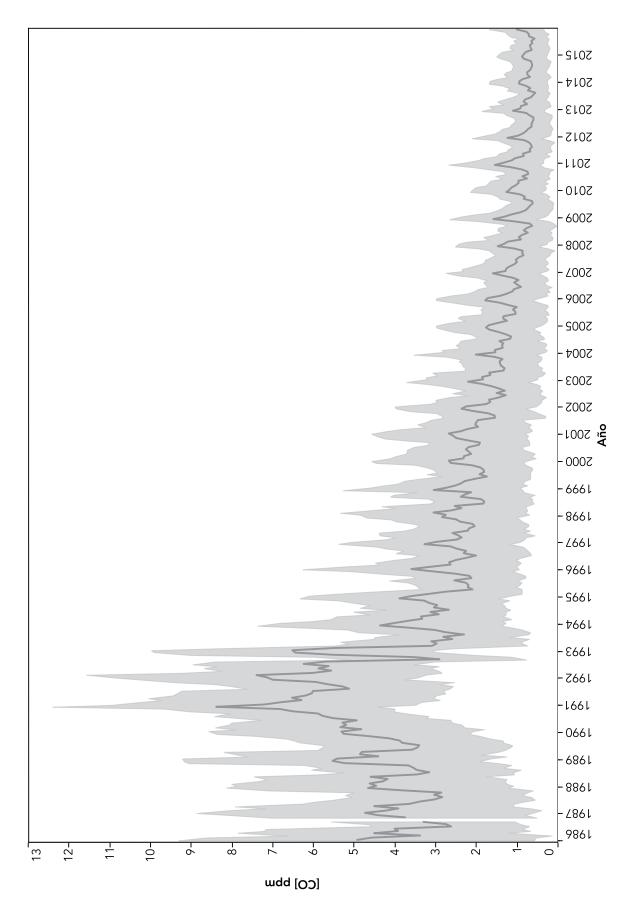


Figura 3.39. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de monóxido de carbono para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2015. La línea de color gris oscuro corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris claro indica la desviación estándar.

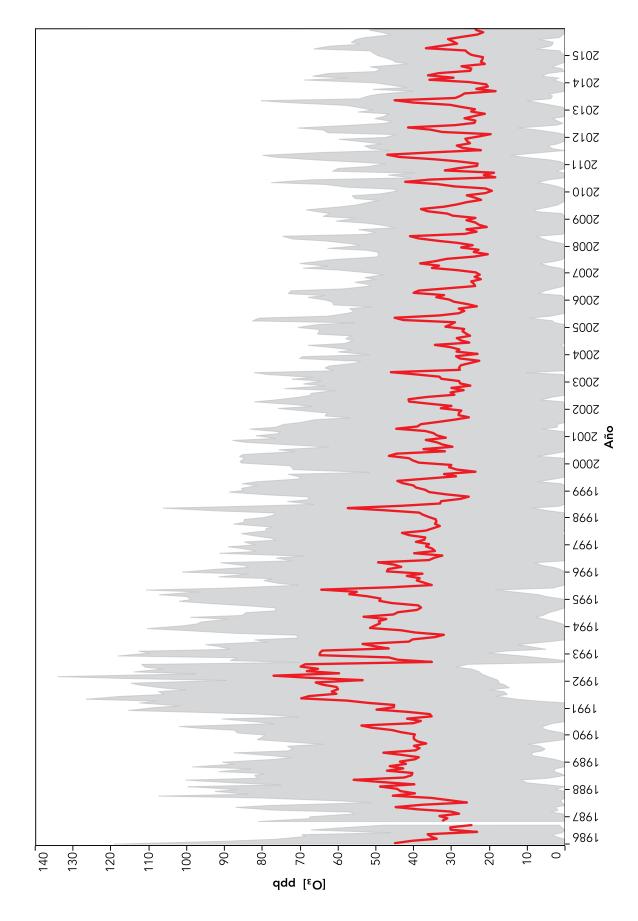


Figura 3.40. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de ozono para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2015. La línea roja corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar

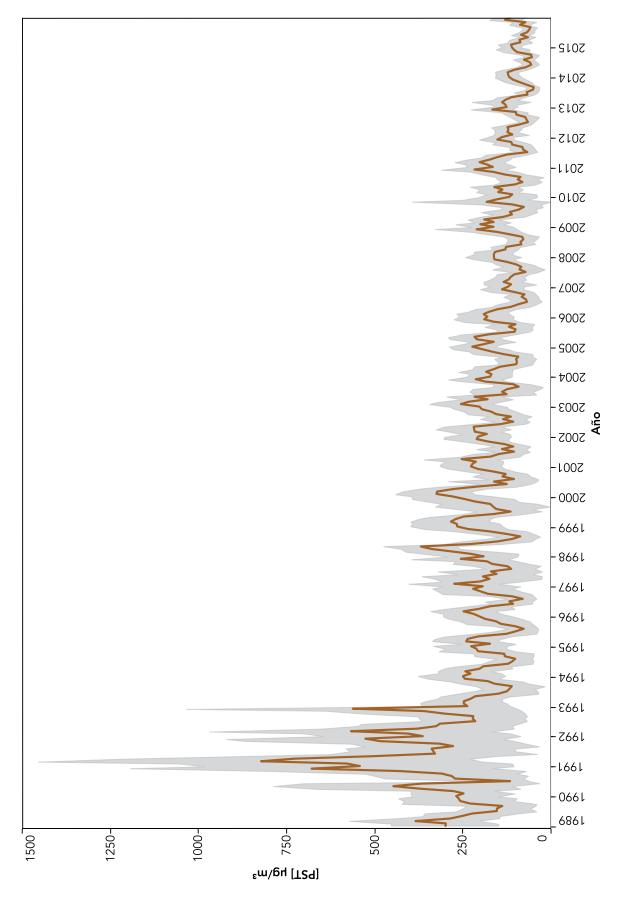


Figura 3.41. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas totales para el periodo de enero de 1989 a diciembre de 2015. La línea café corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

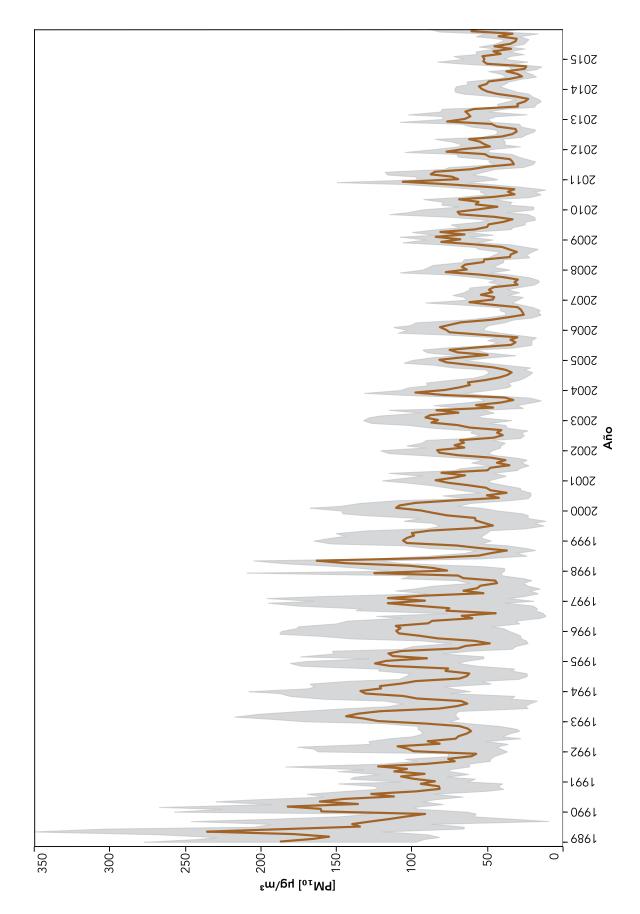


Figura 3.42. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas menores a 10 µm para el periodo de enero de 1989 a diciembre de 2015. La línea café corresponde al promedio mensual la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

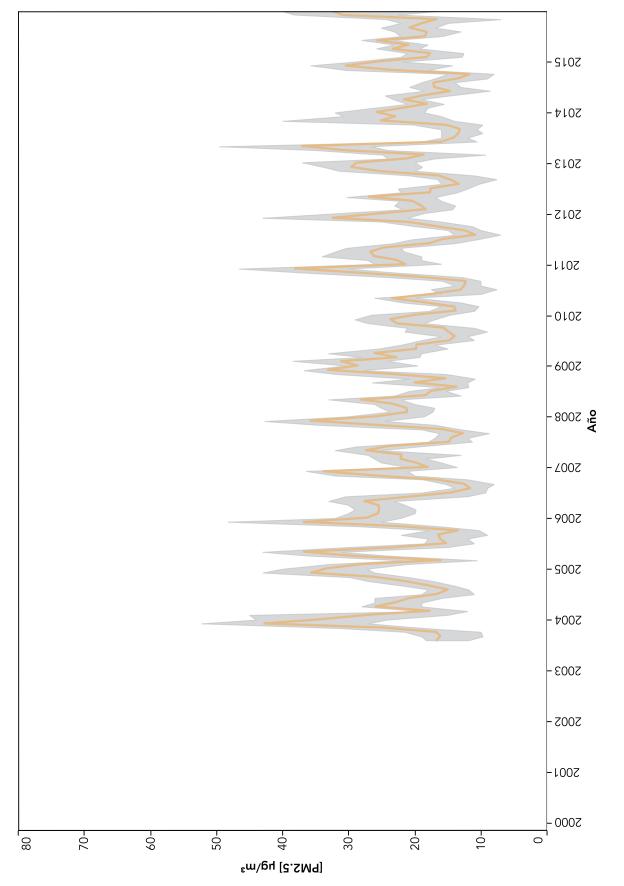


Figura 3.43. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas menores a 2.5 µm para el periodo de agosto de 2004 a diciembre de 2015. La línea café corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.



# 4. Programa de contingencias ambientales atmosféricas

Episodios de activación

El Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) es un programa de emergencia que se activa ante la presencia de niveles de contaminación que comprometen la salud de la población en general. Se activa ante un episodio de contaminación en el que la concentración de ozono o partículas alcanza niveles que podrían poner en riesgo grave la salud de la población que se encuentra expuesta. Tiene el propósito de alertar por la presencia de concentraciones elevadas de contaminación y aplicar acciones inmediatas para reducir las emisiones a la atmósfera de las principales fuentes de contaminación con el propósito de evitar el agravamiento del episodio. La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), que recientemente reemplazó a la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), es la responsable de su activación a partir de los datos del monitoreo que realiza la Ciudad de México.

El PCAA no es una herramienta de gestión para el control de la contaminación, se trata de un instrumento de alerta con acciones correctivas que tienen validez únicamente durante la presencia del episodio. La reducción efectiva de la contaminación solo se logra a través de políticas de control permanentes con acciones especificas para cada una las diferentes categorías de fuentes de emisión. Se trata de un instrumento de carácter local que se restringe al ámbito geográfico en donde se presenta el problema y asume las particularidades fisográficas, meteorológicas y de fuentes de emisión.

En la caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México los niveles de algunos contaminantes secundarios son elevados durante gran parte del año, pero bajo ciertas condiciones naturales o antropogénicas pueden presentarse situaciones extraordinarias capaces de provocar episodios con un grave deterioro de la calidad del aire. Estos episodios de contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México suelen presentarse cuando las condiciones meteorológicas son adversas para la dispersión de la contaminación, cuando ocurren eventos extraordinarios de emisión de contaminantes (naturales o antropogénicos) o por el acarreo de los contaminantes originados en regiones alejadas de la ciudad. Dentro de los aspectos meteorológicos que influyen en los episodios de contaminación se encuentran las inversiones térmicas de superficie o de subsidencia, la estabilidad atmosférica provocada por la influencia de sistemas de alta presión y los episodios de tolvanera provocados por vientos intensos. Dentro de los eventos de emisión extraordinaria se incluye a los incendios forestales, emisiones volcánicas, incremento extraordinario en el tránsito vehicular (principalmente durante días festivos), la quema de juegos de pirotecnia, incendios en el área urbana y las quemas en terrenos agrícolas. El transporte de contaminantes desde fuentes de emisión remota se refiere a la contaminación generada en grandes cantidades en otras entidades y que es arrastrada por el viento hacia la cuenca de México.

El mayor número de episodios de contaminación en los que se activa el PCAA ocurren cuando las condiciones meteorológicas provocan el estancamiento de las masas de aire que se encuentra directamente sobre la cuenca, esto derivado de una condición de estabilidad atmosférica en las regiones baja o media de la atmósfera. La emisión continua de contaminantes por las actividades cotidianas de la ciudad dentro de esa capa de aire estáble genera una acumulación progresiva de los contaminantes, la severidad del episodio dependerá de la intensidad y duración de la estabilidad, la magnitud de la radiación solar, la presencia de inversiones térmicas, la hora del día y la composición de la masa de aire contaminando. Se ha observado que algunos de estos episodios pueden prolongarse durante varios días consecutivos, provocando un efecto acumulativo en los niveles de contaminación y en la severidad del episodio. El mayor riesgo se presenta cuando las condiciones meteorológicas son favorables para la formación de contaminantes secundarios, como el ozono y los aerosoles.

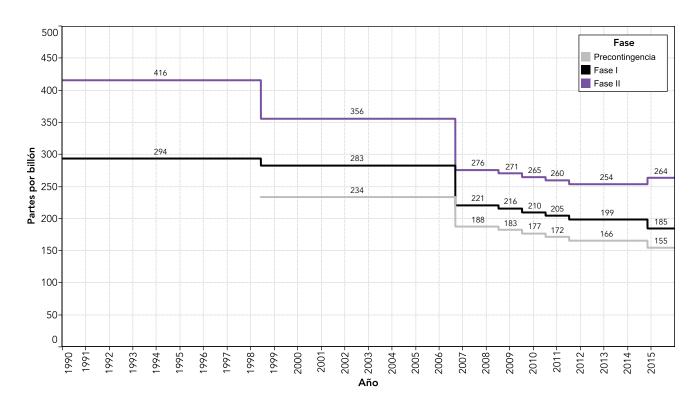
También es frecuente que en algunas fechas relacionadas con celebraciones especiales, como el Día de la Amistad (14 de febrero) o el Día de las Madres (10 de mayo), se registre un incremento importante en el tránsito vehicular, con el consecuente aumento en las emisiones de compuestos precursores del esmog fotoquímico. En estos días generalmente se observan altas concentraciones de ozono y partículas finas. Por otra parte, en días como el 25 de diciembre y 1 de enero se observan elevadas concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> debido al incremento en el tránsito vehicular y la quema excesiva de juegos de pirotecnia.

# Efectos de la modificación de las normas para ozono y partículas suspendidas en los niveles de activación del PCAA

Los cambios en los valores de las normas NOM-020-SSA1-2014 y NOM-025-SSA1-2014, para ozono y partículas, respectivamente, modificaron los valores de activación de las diferentes fases del PCAA, esto debido a que los valores de activación se encuentran ligados al valor del índice y no a la concentración del contaminante. Por lo tanto, una modificación en el valor de la norma, obliga al ajuste del algoritmo de cálculo para asignar el valor de 100 puntos a la concentración del promedio horario, en caso de ozono, y del promedio de 24 horas para el caso de PM<sub>10</sub>. Esto afecta también a los diferentes puntos de quiebre del índice.

De acuerdo con el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas, la Fase de Precontingencia para ozono se activa cuando la concentración del promedio horario alcanza los 151 puntos en el índice de calidad del aire. Antes de la modificación de la norma este valor era equiva-

lente a 166 ppb, con la modificación disminuyó a 155 ppb, es decir se redujo en 11 ppb. En el caso de la Fase I, la activación ocurre cuando la concentración del promedio horario supera los 180 puntos en el índice, anteriormente este valor era equivalente a 198 ppb, con la actualización de la norma disminuyó a 184 ppb. En el caso de la Fase II, el valor de activación actualmente es de 231 puntos, pasó de 254 a 265 ppb. Para PM<sub>10</sub> el valor de activación de 151 puntos en el índice de la Fase de Precontingencia pasó de 222 a 215 µg/m³, el valor de 175 puntos de la Fase I de Contingencia cambió de 270 a 283 µg/m³, y el valor de 231 puntos para la Fase II de Contingencia pasó de 370 a 376 µg/m³. El resto de los contaminantes no se encuentran considerados dentro del PCAA, debido a que sus concentraciones pocas veces superan la norma, excepto las PM<sub>2.5</sub> que por sus niveles y riesgos para la salud deben ser incorporadas dentro del programa.



**Figura 4.1.** Histórico de las modificaciones a los valores de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas. Los valores que aparecen sobre cada línea indican la concentración en ppb.

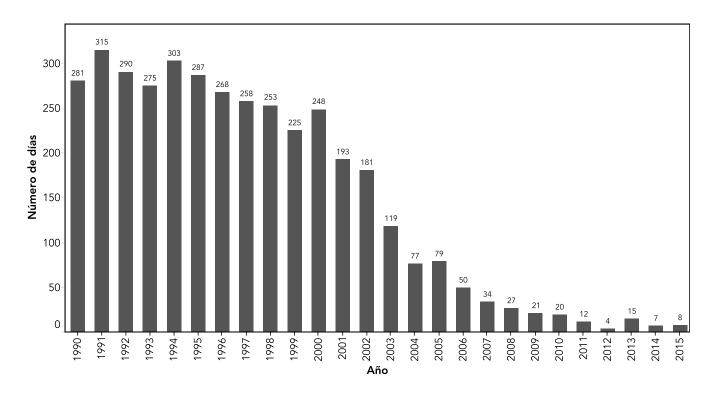
## Episodios de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas durante 2015

Durante 2015 la Fase de Precontingencia del PCAA se activó en siete ocasiones, seis por ozono y una por PM<sub>10</sub>. En el caso de ozono, todas las activaciones estuvieron relacionadas con episodios de estabilidad atmosférica acompañados por el estancamiento de los contaminantes en el sur de la ciudad. Los episodios ocurrieron en las fechas siguientes: 3 de marzo, 8 de abril, 5 de mayo, 9 de mayo, 10 de junio y 4 octubre. Con excepción del episodio que ocurrió en octubre, el resto se presentaron durante la temporada de ozono. En el caso del episodio de partículas, la activación ocurrió el 25 de diciembre y estuvo relacionada con la quema excesiva de juegos de pirotecnia durante las celebraciones de la Nochebuena y Navidad. El episodio más severo de contaminación por ozono ocurrió el 10 de junio cuando la concentración del contaminante alcanzó 179 ppb (que equivale a 175 puntos en el índice de calidad del aire). En el caso del episodio

por partículas, la concentración de PM<sub>10</sub> alcanzó un promedio móvil de 243 μg/m³, que equivale a 161 puntos en el índice, este día se registró también una elevada concentración de PM<sub>2.5</sub> con un promedio móvil máximo de 128 μg/m³.

En 2014 se reportaron tres activaciones de la Fase de Precontingencia por ozono, este incremento en el número de episodios se relacionó con la reducción del valor de activación que pasó de 166 ppb a 155 ppb. Es decir, si en 2014 se hubieran aplicado los valores de 2015, la Fase de Precontingencia se hubiera activado hasta en 7 ocasiones. En la Figura 4.3 se compara el número de días con concentraciones de ozono mayores o igual a 155 ppb entre 1990 y 2015.

Con el propósito de documentar la ocurrencia de estos episodios y analizar las características que los motivaron, en este capítulo se ofrece una descripción de cada uno de ellos y se proporciona el contexto meteorológico en el que sucedieron.



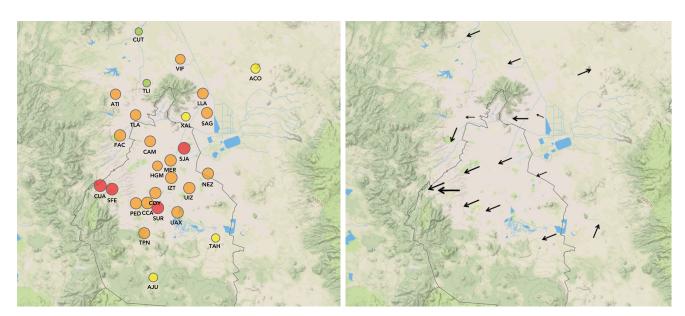
**Figura 4.2.** Número de días con concentraciones máximas mayores al valor actual del umbral para la Fase de Precontingencia (>=155 ppb).

#### Ozono: 3 de marzo de 2015 16:00

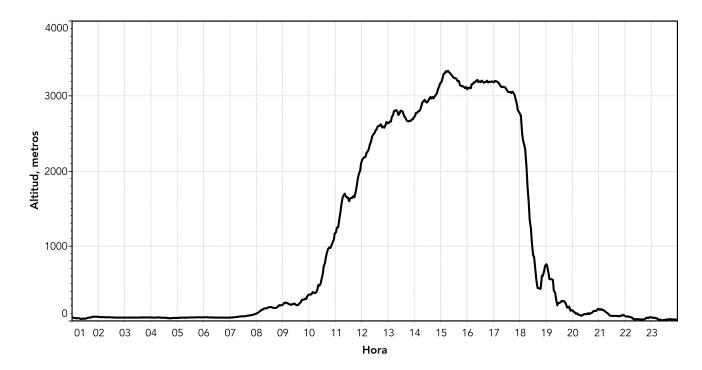
A partir del sábado 28 de febrero y hasta el martes 3 de marzo, el centro del país se encontraba bajo la influencia de un sistema de alta presión, que diminuyó la capacidad dispersiva de la atmósfera, favoreció nubosidad escasa, además de viento débil en superficie. Los bajos niveles de emisión de precursores durante el fin de semana, evitaron que el ozono alcanzará concentraciones superiores a los valores de activación del PCAA, sin embargo reportaron niveles mayores al valor límite de la norma durante el domingo (124 ppb) y el lunes (120 ppb).

Durante la mañana del martes 3 de marzo se observó una inversión térmica de superficie, que se mantuvo hasta las 9:00 que evitó el desarrollo de la altura de la capa de mezcla y favoreció la acumulación de la contaminación. Con el rompimiento de inversión, la altura de capa de mezcla continuó desarrollando alcanzando un máximo entre las 15:00 y 17:00 (Figura 4.4). El viento de superficie fue de intensidad débil durante la mayor parte del día. Durante la madrugada fue menor a 1 m/s, aumentando ligeramente después de las 8:00, sin embargo, se mantuvo con baja intensidad durante la mayor parte del día (Figura 4.5). La dirección predominante del viento

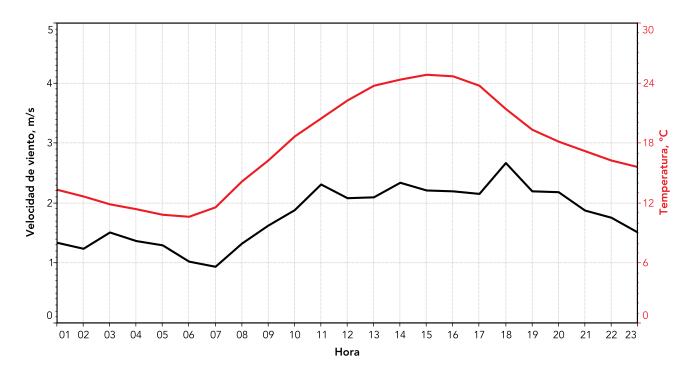
fue hacia el suroeste, con una corriente de viento al oeste de la Sierra de Guadalupe del norte. En el perfil vertical se observó una capa de aire relativamente estable por debajo de los 800 metros, con viento débil (menor a 2 m/s) y escaso movimiento vertical (Figura 4.6). La dirección predominante del flujo de viento en la superficie y la escasa dispersión vertical, contribuyeron al arrastre de los precursores del ozono hacia el centro y suroeste. La orografía de la región favoreció la formación de una zona de convergencia, en donde se acumuló parte de la contaminación. Alrededor de las 14:00 se observó una corriente de viento proveniente del sureste, que impulsó parte de la contaminación hacia el centro, contribuyendo al incremento en la concentración de ozono en esa zona. A las 16:00 se activó la Fase de Precontingencia, cuando se registraron concentraciones superiores a 154 ppb (150 puntos) en las estaciones de Cuajimalpa (CUA), Santa Fe (SFE), Santa Ursula (SUR) y en la estación San Juan de Aragon (SJA) (ver Figura 4.3). La concentración máxima fue de 160 ppb en la estación Cuajimalpa (Figura 4.7). Con el debilitamiento del sistema de alta presión, mejoró gradualmente la dispersión. La Fase se desactivó al día siguiente.



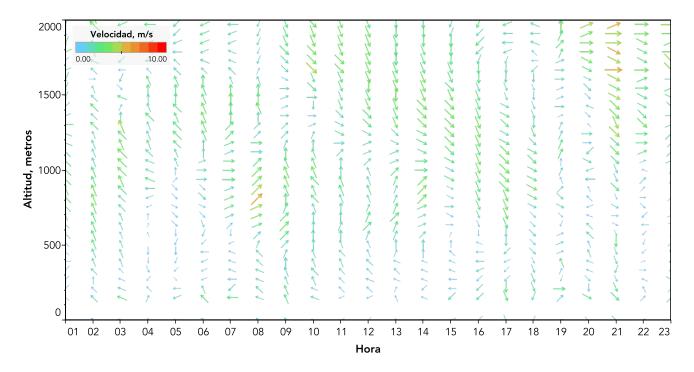
**Figura 4.3.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 3 de marzo a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 16:00.



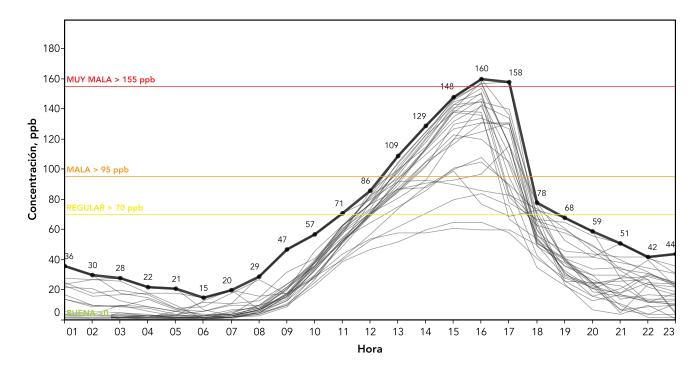
**Figura 4.4.** Desarrollo de la altura de mezclado sobre la Ciudad de México durante el día 3 de marzo de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.



**Figura 4.5.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.6.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 3 de marzo de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

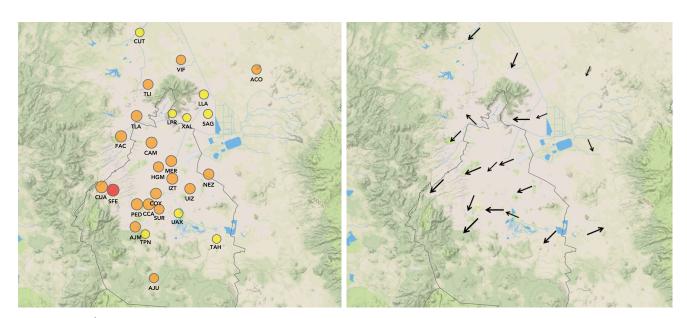


**Figura 4.7.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 3 de marzo de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.

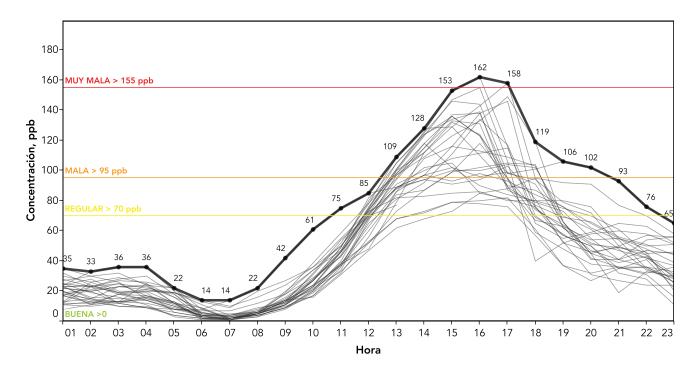
#### Ozono: 8 de abril de 2015, 16:00

El martes 8 de abril a las 16:00 se activó por segunda vez la Fase de Precontingencia del PCAA cuando la concentración de ozono alcanzó una concentración máxima de 162 ppb, equivalentes a 159 puntos en el índice, en la estación Santa Fe (SFE), ubicada en la delegación Cuajimalpa al suroeste de la Ciudad de México (Figuras 4.8 y 4.9). Este día se observó en la atmósfera baja una elongación débil de circulación anticiclónica procedente de los estados del norte del país, además de una circulación anticiclónica sobre el estado de Colima, además en la atmósfera media se presentó una circulación anticiclónica que afectaba a la región central. Estos sistemas fueron de intensidad moderada pero suficientes para provocar ausencia de nublados, estabilidad atmosférica y ambiente brumoso desde la mañana y hasta media tarde. Por otra parte, el perfil atmosférico indicaba una región de estabilidad entre los 400 y 1000 metros, y moderadamente inestable entre los 1000 y 2400 m. Se observó una inversión térmica en la mañana con una altura de 350 metros y espesor de 500 metros, que limitó el desarrollo de la altura de capa de mezclado hasta el mediodía (Figura 4.11). Se observó también viento débil en superficie entre 6:00 y 15:00 con una intensidad de 2 m/s o menor (Figura 4.10). En cuanto al perfil de viento se observó una capa con viento débil por debajo de los 800 metros, entre 9:00 y las 17:00. Estas condiciones impidieron una adecuada dispersión de los precursores de ozono (Figura 4.12).

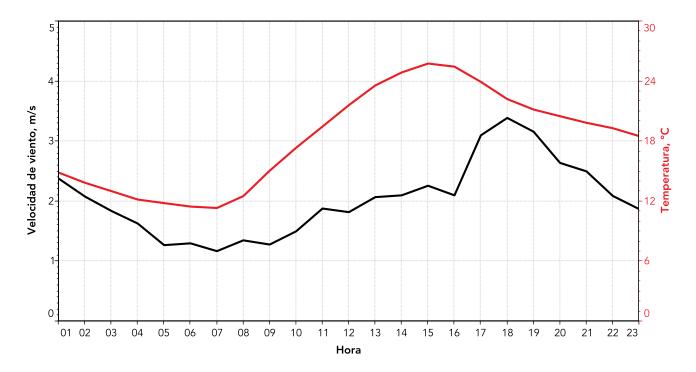
Durante la mañana, entre las 8:00 y las 11:00 se observó un lento desplazamiento en el flujo de aire desde el norte hacia el centro y suroeste de la ciudad. Entre las 11:00 y las16:00 la dirección del viento se estructuró hacia el suroeste (Figura 4.8). El perfil del viento registró bajas velocidades y una dirección predominante hacia el sur y suroeste hasta una altura de 500 metros (Figura 4.12). La falta de nubosidad e intensa radiación contribuyeron a la formación del esmog fotoguímico y la producción de ozono. La contaminación se acumuló gradualmente en la región suroeste, en donde se observaron las máximas concentraciones de ozono. La influencia de los sistemas se mantuvo hasta el miércoles, provocando que la concentración máxima de ozono superara la del día martes, con un valor de 169 ppb (165 puntos) a las 16:00 en la estación Santa Ursula (SUR), en la delegación Coyoacán. La Fase se desactivó hasta el jueves 10 de abril a las 18:00.



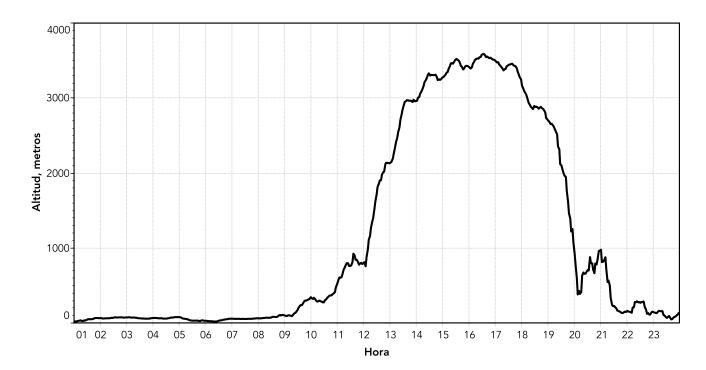
**Figura 4.8.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 8 de abril a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 16:00.



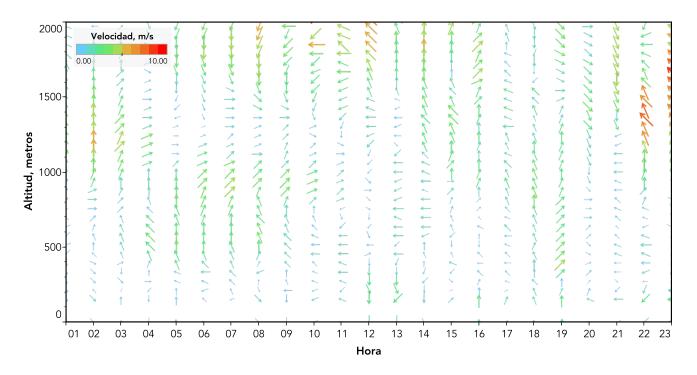
**Figura 4.9.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 8 de abril de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.



**Figura 4.10.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.11.** Desarrollo de la altura de mezclado sobre la Ciudad de México durante el día 8 de abril de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

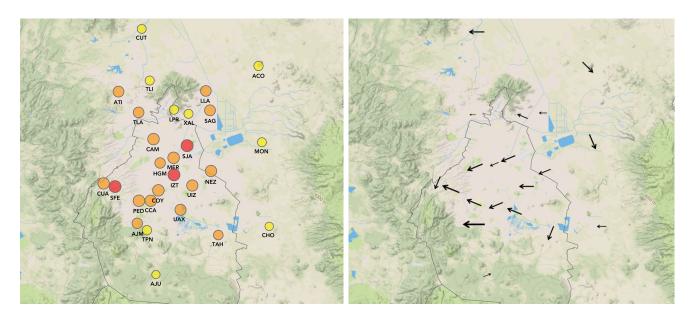


**Figura 4.12.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 8 de abril de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

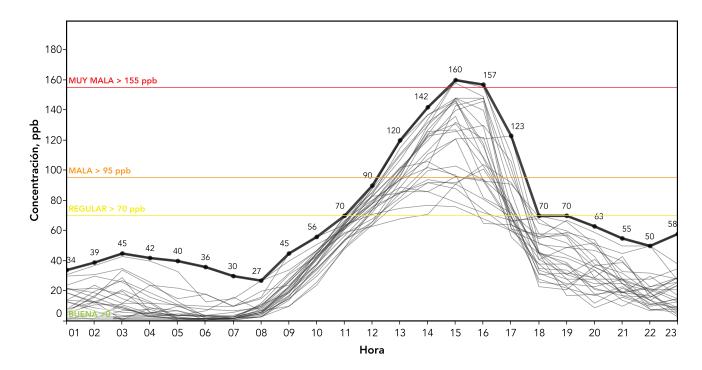
#### Ozono: 5 de mayo de 2015, 15:00

El martes 5 de mayo se observó la influencia en la cuenca de México de una circulación anticiclónica sobre la porción sur del país en las capas atmosféricas cercanas a la superficie. En la región media de la troposfera se observó una elongación de alta presión que incursionó desde el oeste del territorio, extendiéndose hacia el centro y sur. Provocando estabilidad atmosférica hasta una altura de 2 km, cielo despejado, viento débil y estancamiento de los contaminantes durante la mayor parte de la mañana. El perfil vertical del viento mostraba una capa estable con viento débil entre las 8:00 y 15:00 horas, con dirección predominante hacia el suroeste. No se presentó inversión térmica y la altura de capa de mezcla alcanzó un máximo cercano a los 3500 m alrededor de las 15:00. El día fue cálido con una temperatura máxima de 28°C a las 15:00. A nivel de superficie la velocidad promedio del viento fue baja (menor a 2 m/s) durante la mañana, con un aumento en la intensidad a partir del mediodía y una velocidad máxima alrededor de las 17:00. El campo de flujo de viento en superficie mostraba una dirección predominante hacia el suroeste (Figura 4.13), indicando un arrastre gradual de la contaminación desde el norte y centro de la zona metropolitana hacia el suroeste de la Ciudad de México. Alrededor de las 14:00 se observó la formación de una zona de convergencia sobre el centro de la Ciudad, que favoreció un estancamiento de los contaminantes en esa región. Esta combinación de condiciones meteorológicas provocó que a las 15:00 la concentración de ozono alcanzara un valor máximo de 160 ppb (156 puntos) en las estaciones Iztacalco (IZT), en la delegación Iztacalco, y San Juan de Aragón (SJA), en Gustavo A. Madero, mientras que la estación de Santa Fe (SFE), en la delegación Cuajimalpa, registró una concentración máxima de 158 ppb (154 puntos), activando la Fase de Precontingencia (Figura 4.14). A las 16:00 la concentración de ozono se mantuvo por encima de los 150 puntos en IZT. A partir de las 16:00, una fuerte corriente contribuyó a una rápida dispersión de la contaminación (Figura 4.15).

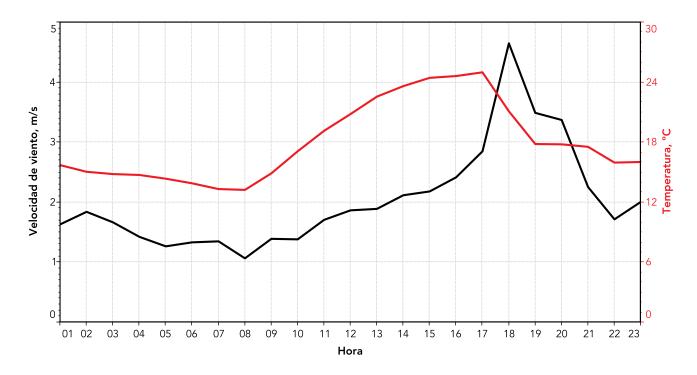
El miércoles 6 de mayo se observó una leve mejoría y la concentración de ozono no superó los 150 puntos, lo que permitió la suspensión de la Fase de Precontingencia a las 18:00.



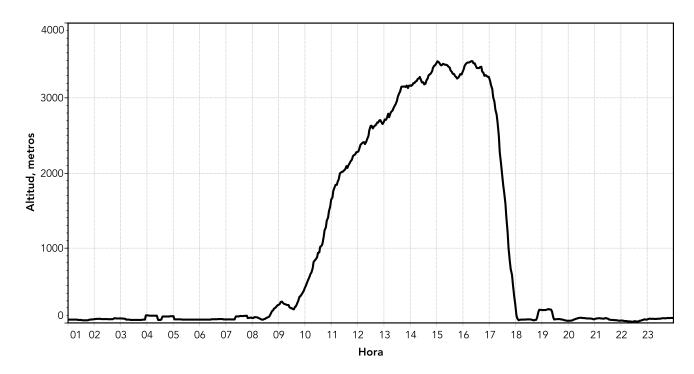
**Figura 4.13.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 5 de mayo a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 15:00.



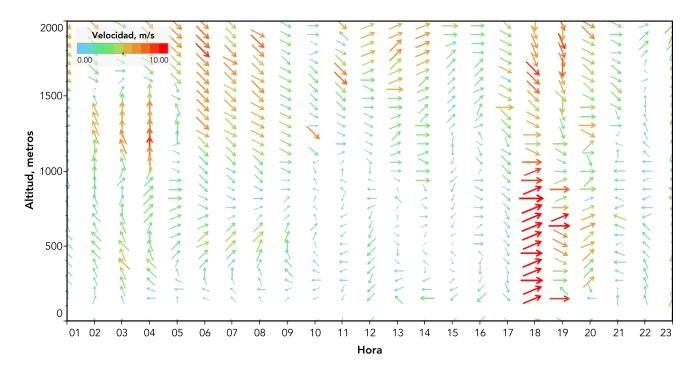
**Figura 4.14.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 5 de mayo de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.



**Figura 4.15.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.16.** Desarrollo de la altura de mezclado sobre la Ciudad de México durante el día 5 de mayo de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.



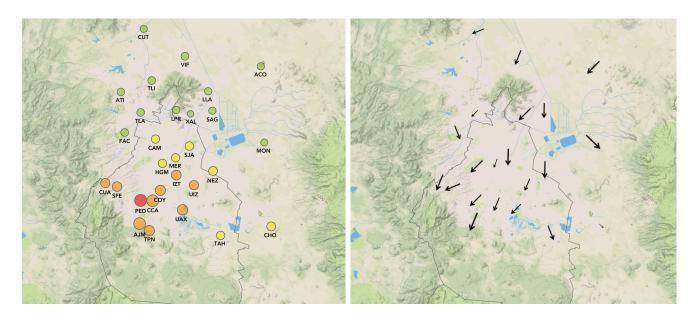
**Figura 4.17.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 5 de mayo de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

#### Ozono: 9 de mayo de 2015, 16:00

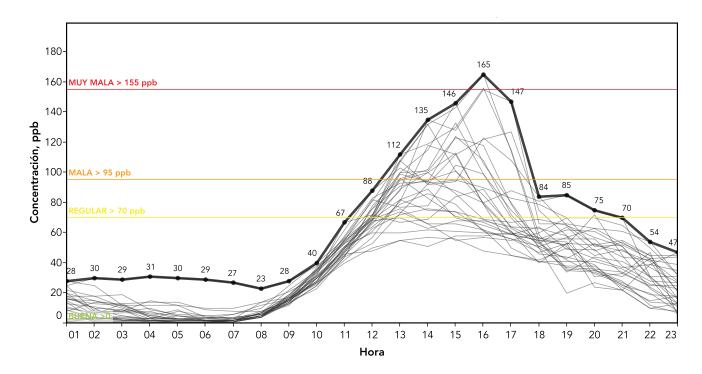
El sábado 9 de mayo la interacción de dos sistemas anticiclónicos, uno ubicado en la porción norte del Golfo de México y el otro en los estados del occidente, centro y sur del país, junto con una elongación de baja presión que se extendía sobre las regiones noroeste y norte del territorio nacional, provocó condiciones de estabilidad atmosférica, viento de superficie de intensidad débil a moderada, así como cielo despejado por la mañana a medio nublado durante la tarde. El sondeo meteorológico indicaba una condición ligeramente inestable y una inversión térmica de superficie con un espesor de 44 metros que permaneció hasta las 8:00 de la mañana. Adicionalmente, se observó un incremento importante en el tránsito vehicular después del mediodía, relacionado con la celebración anticipada del Día de las Madres.

La intensidad del viento de superficie fue débil a moderada, con promedio menor a 2 m/s durante la mañana que aumentó ligeramente después del mediodía con un máximo entre las 18:00 y 19:00. El día fue cálido con una temperatura máxima de 29°C a las 16:00. El viento de superficie tuvo una dirección predominante hacia el suroeste a partir de las 8:00 (Figura 4.18). La altura

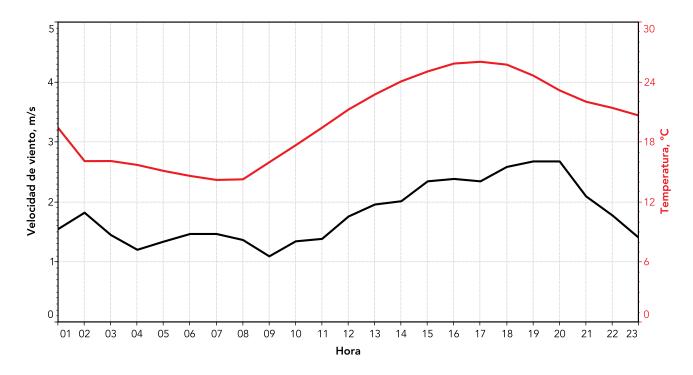
de mezclado alcanzó un máximo de 3800 m alrededor de las 15:00 (Figura 4.21). El perfil vertical mostró una región con viento débil por debajo de los 800 metros, con un incremento significativo después de las 18:00 (Figura 4.22). Esta combinación de estabilidad atmosférica, radiación solar, alta temperatura e incremento en el tránsito vehicular, fue favorable para la formación del esmog fotoquímico. El arrastre continuo de las emisiones desde el norte y centro, hacia el suroeste de la ciudad provocó que las estaciones de esa región registraran valores elevados de ozono. A las 16:00 la concentración reportada en la estación Pedregal (PED), en la delegación Alvaro Obregón, superó el valor del umbral de la Fase de Precontingencia con una concentración de 165 ppb (161 puntos en el índice) (ver Figuras 4.18 y 4.19). A las . 18:00 se presentó un incremento en la intensidad del viento, tanto en superficie como en la vertical, que contribuyó favorablemente a la dispersión de la contaminación. El domingo 10 de mayo se mantuvo la influencia de los sistemas anticiclónicos, sin embargo, la concentración de ozono no superó los 150 puntos, lo que permitió que el episodio se suspendiera a partir de las 18:00.



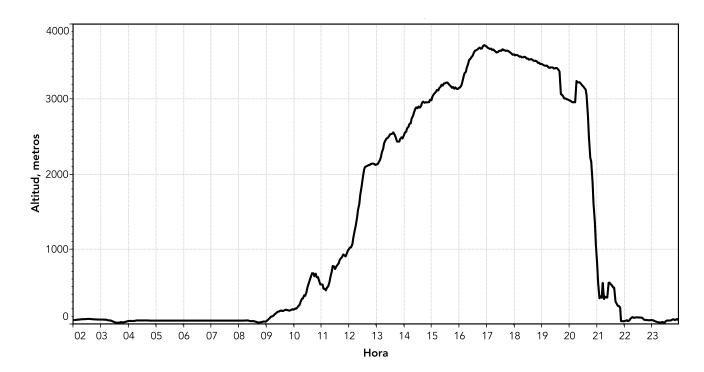
**Figura 4.18.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 9 de mayo a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 16:00.



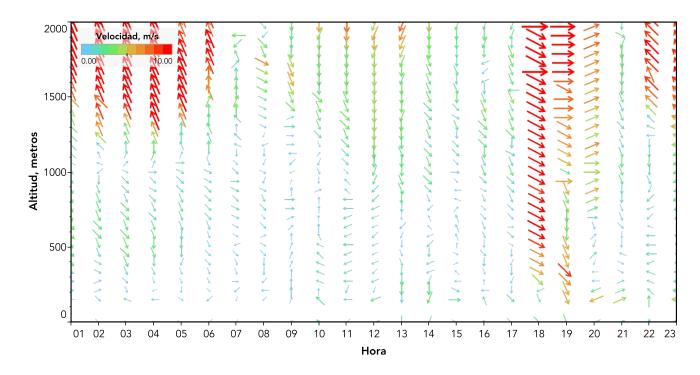
**Figura 4.19.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 9 de mayo de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.



**Figura 4.20.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.21.** Desarrollo de la altura de capa de mezcla sobre la Ciudad de México durante el día 9 de mayo de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

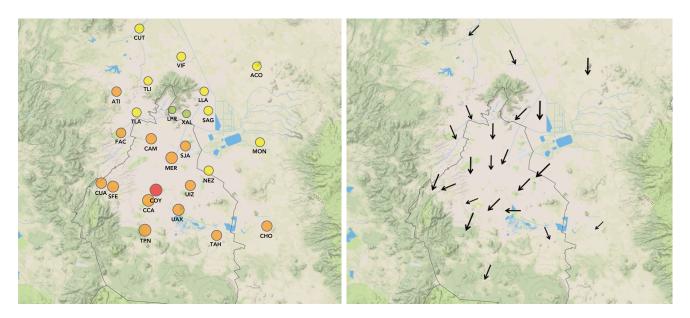


**Figura 4.22.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 9 de mayo de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

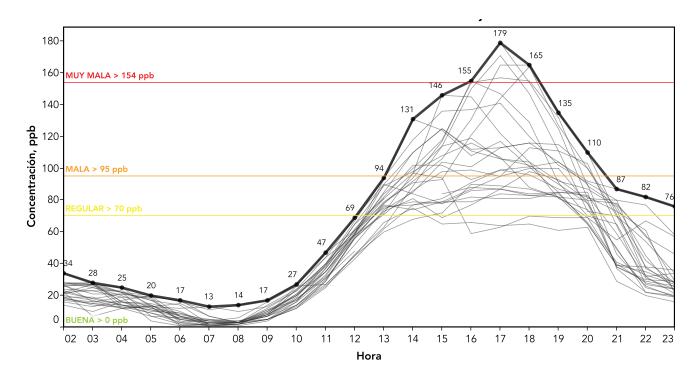
#### Ozono: 10 de junio de 2015, 16:00

El miércoles 10 de junio en capas bajas de la atmósfera se observó un sistema de circulación anticiclónica sobre el estado de Puebla, que afectaba directamente a la cuenca de México. En niveles medios y altos de la tropósfera se presentó otro sistema anticiclónico que comprendía desde la región noroeste, hasta las porciones centro y sur del territorio. Esta estructura meteorológica provocó un escaso transporte de humedad, estabilidad atmosférica, viento débil y estancamiento de los contaminantes durante la mañana y primeras horas de la tarde. El radiosondeo mostraba estabilidad en el perfil atmosférico hasta una altura de 2600 metros. Además se observó una inversión térmica a una altura de 730 metros, con una intensidad de 0.2 °C y espesor de 100 metros que se disipó alrededor de las 11:00. El desarrollo de la altura de mezclado fue lento, a las 13:00 apenas superaba los 2000 metros, y a las 16:00 alcanzó una altura máxima de 3200 metros (Figura 4.26). El perfil vertical de viento fue de intensidad débil durante la mañana con una componente sur en los primeros 1000 metros, por la tarde se observó una capa de viento débil por debajo de los 800 metros (Figura 4.27). El día fue cálido y soleado. La intensidad promedio del viento de superficie fue débil durante la mañana y moderado por la noche, con un incremento gradual a lo largo del día, sin embargo, fue insuficiente para una adecuada dispersión de la contaminación.

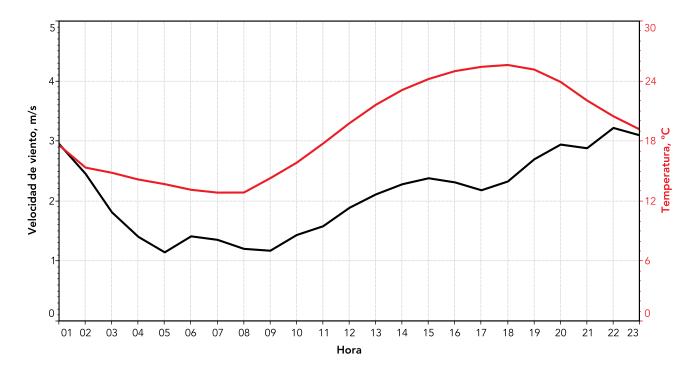
La condición de estabilidad atmosférica, en combinación con un desplazamiento continuo de las masas de aire en superficie al suroeste y la intensa radiación solar provocaron que a las 16:00 la concentración de ozono alcanzará el valor de activación de la Fase de Precontingencia con 155 ppb (151 puntos) en la estación Coyoacán (COY). A las 17:00 horas se observaron los valores máximos del día en las estaciones Pedregal (PED), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Santa Fe (SFE) y Tlalpan (TPN), que registraron concentraciones de 179, 171, 165 y 157 ppb, respectivamente (ver Figuras 4.23 y 4.24). La condición de estabilidad atmosférica, con viento hacia el suroeste, se mantuvo durante el día viernes cuando se registró una concentración máxima de 154 ppb (150 puntos) en la estación PED, por lo tanto la CAMe suspendió la Fase de Precontingencia hasta el día sábado a las 15:00.



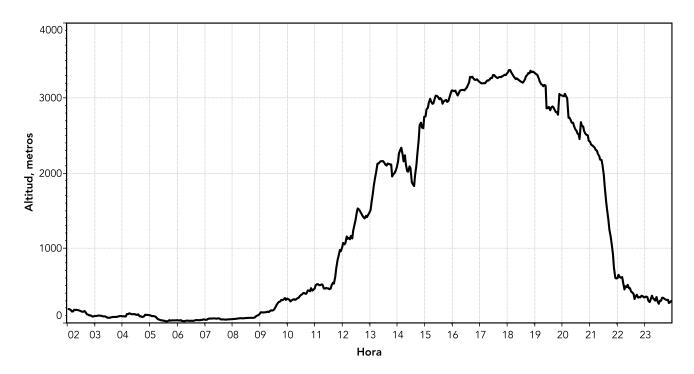
**Figura 4.23.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 10 de junio a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 16:00.



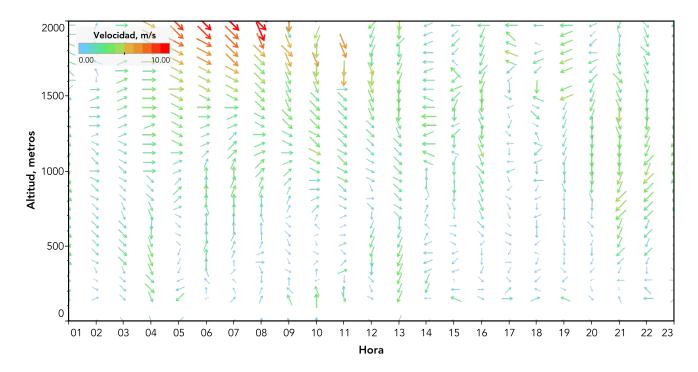
**Figura 4.24.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 10 de junio de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.



**Figura 4.25.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.26.** Desarrollo de la altura de mezclado sobre la Ciudad de México durante el día 10 de junio de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

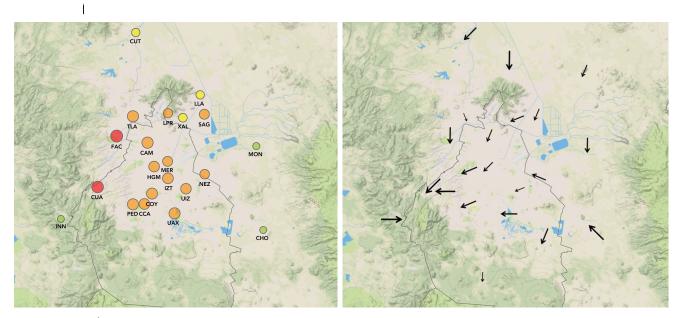


**Figura 4.27.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 10 de junio de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

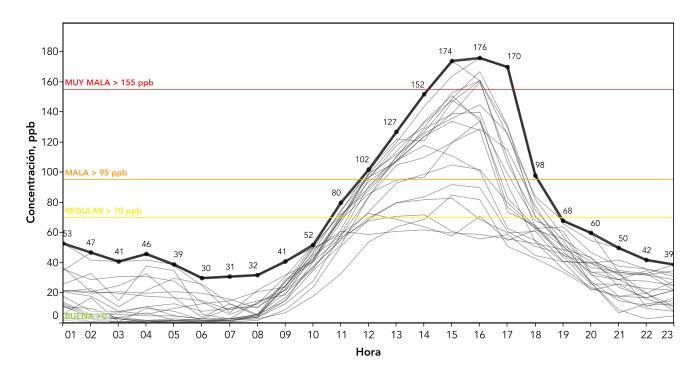
#### Ozono: 4 de octubre de 2015, 15:00

Durante el domingo 4 de octubre se observó en niveles bajos y medios de la tropósfera una circulación anticiclónica que afectó a los estados del sureste, sur y centro del país, así como un sistema de baja presión ubicado sobre la porción sur del Golfo de California, frente a las costas de Sinaloa, relacionada con un sistema ciclónico que afectaba la región noroeste del territorio nacional. Otra circulación ciclónica se extendía sobre el Golfo de México, afectando la península de Yucatán. La combinación de estos sistemas provocó ligero transporte de humedad hacia la región central del país, estabilidad atmosférica, temperatura moderada, viento con intensidad débil a moderada en superficie y cielo mayormente despejado. La dirección predominante del flujo de viento entre las 8:00 y 15:00 fue hacia el suroeste (Figura 4.28), con una componente hacia el oeste alrededor del mediodía. La velocidad promedio del viento de superficie estuvo entre 1 y 2 m/s durante la mayor parte del día, con un ligero incremento entre las 16:00 y 17:00 (Figura 4.30). El perfil vertical del viento registró una capa de aire con una intensidad menor a 2 m/s y dirección predominante hacia el oeste, entre las 6:00 y 10:00 (Figura 4.32). El resto del día se observó un incremento en la velocidad del viento en la vertical, así como un incremento en la inestabilidad atmosférica.

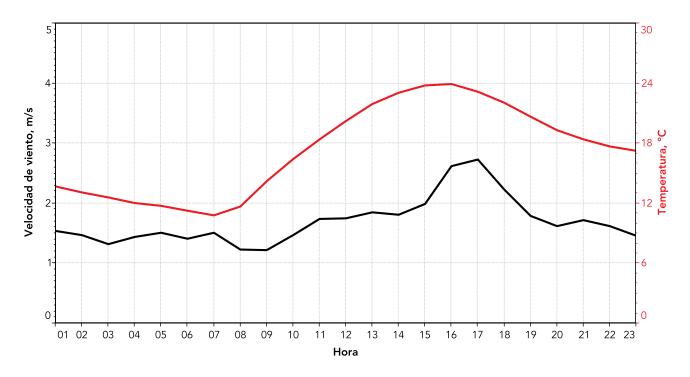
El domingo las concentraciones asociadas a las emisiones provenientes del tránsito vehicular diminuyeron significativamente, con una reducción mayor en la concentración de óxidos de nitrógeno. Este episodio de ozono fue provocado por el efecto de fin de semana, el cual se presenta cuando existe una disminución de óxidos de nitrógeno con respecto a los compuestos orgánicos volátiles (COV) en un régimen condicionado a COV. Las condiciones de estabilidad atmosférica, la intensa radiación solar y la acumulación de la contaminación en el suroeste, exacerbaron el episodio. A las 15:00 se observó un incremento en la estación FES Acatlán (FAC) con máximo de 174 ppb (170 puntos en el índice), activando la Fase de Precontingencia (Figuras 4.28 y 4.29). A medida que aumentaba la acumulación en el sur, el ozono continuaba en incremento. A las 17:00 la concentración alcanzó 176 ppb (172 puntos) en Cuajimalpa (CUA), y prácticamente todas las estaciones al poniente rebasaron el umbral de la Fase de Precontingencia. La concentración disminuyó después de las 18:00. La Fase se desactivó el lunes 5 de octubre a las 18:00.



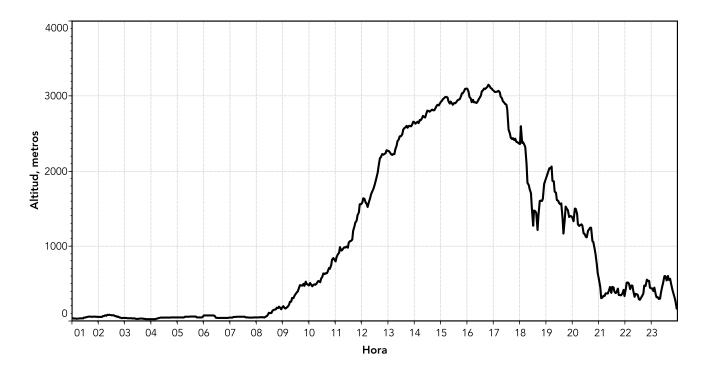
**Figura 4.28.** Índice de calidad del aire en las estaciones de monitoreo y campo de vientos. En la figura de la izquierda se indica la categoría del índice observado en cada estación el 4 de octubre a las 16:00, el tamaño es proporcional a la concentración. El gráfico de la derecha muestra el vector promedio de cada estación para el periodo comprendido entre las 8:00 y 15:00.



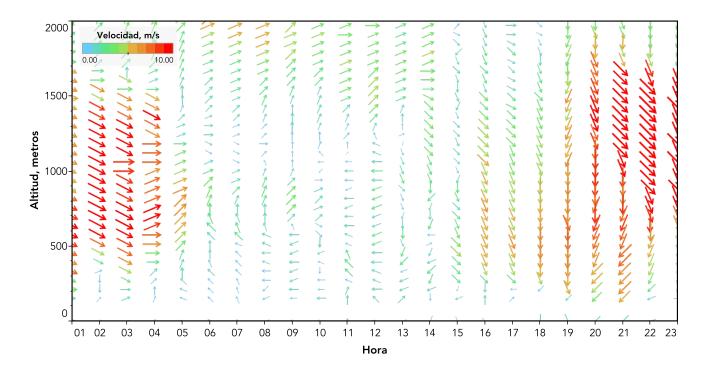
**Figura 4.29.** Promedio horario de la concentración de ozono durante el día 4 de octubre de 2015. Las líneas delgadas corresponden a las concentraciones observadas en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo, en el gráfico se resaltan los valores máximos de cada hora. Las líneas horizontales indican las categorías del índice.



**Figura 4.30.** Perfiles de la velocidad de viento (línea negra) y de la temperatura promedio (línea roja). Los promedios horarios se calcularon empleando únicamente los valores observados en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México.



**Figura 4.31.** Desarrollo de la altura de mezclado sobre la Ciudad de México durante el día 4 de octubre de 2015. Las observaciones se realizaron en el Supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.



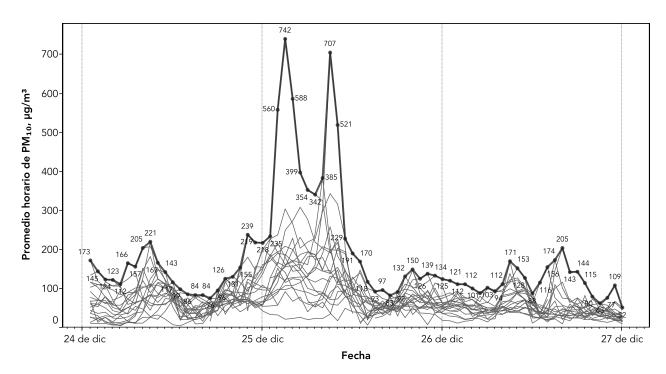
**Figura 4.32.** Perfil vertical de la velocidad del viento observado sobre la Ciudad de México el día 4 de octubre de 2015. Los vectores indican el flujo de viento a diferentes altitudes, el tamaño y color son proporcionales a la intensidad del viento.

#### PM<sub>10</sub>: 25 de diciembre de 2015

De acuerdo con la información histórica del monitoreo de la calidad del aire, se ha observado que durante las celebraciones decembrinas las concentraciones de las diferentes fracciones de partículas suspendidas registran un incremento extraordinario con respecto a los niveles cotidianos del contaminante, relacionado con el aumento en el tránsito vehicular durante la víspera de las celebraciones de Navidad y de Año Nuevo, y a la intensa quema de juegos de pirotecnia. Las condiciones meteorológicas propias de la temporada invernal, que se caracterizan por una disminución de la temperatura, estabilidad atmosférica e inversiones térmicas de superficie, agravan estos episodios de contaminación. Es frecuente que el 25 de diciembre y 1 de enero, se active la Fase de Precontingencia para PM<sub>10</sub>.

Este año, la intensa quema de pirotecnia y la presencia de fogatas, principalmente en el área conurbada, provocaron un incremento extraordinario en las concentraciones de  $PM_{10}$ . En la Figura 4.33 se muestra la evolución de la concentración horaria de  $PM_{10}$  durante los días 24 a 26 de diciem-

bre, como se puede observar, después de la medianoche del 24 de diciembre se presentó un rápido incremento en la concentración de PM<sub>10</sub>, que alcanzó una concentración máxima de 742 µg/m³ a las 3:00 en la estación Villa de las Flores (VIF), en Coacalco, Estado de México, a la hora de mayor actividad de la pirotecnia. A partir de las 4:00 la concentración disminuyó gradualmente hasta alcanzar un mínimo alrededor de las 7:00. A las 9:00 se presentó nuevamente un incremento con un valor de 707 µg/m³ en la estación Benito Juárez (BJU), en la delegación Benito Juárez, Ciudad de México, este segundo pico fue provocado por el arrastre de contaminantes hacia el centro y sur, además de la contribución de aerosoles secundarios. Debido a que el índice de PM<sub>10</sub> se calcula como el promedio móvil de 24 horas, hasta las 8 de la mañana se superó el umbral de 150 de la Fase de Precontingencia. El resto del día se observó una dispersión gradual de la contaminación. El día 26 las condiciones meteorológicas fueron favorables para la dispersión permitiendo la suspensión de la Fase de Precontingencia.



**Figura 4.33.** Promedio horario de la concentración de  $PM_{10}$  reportadas en las diferentes estaciones de monitoreo durante los días 24 al 26 de diciembre. Las líneas delgadas corresponden a los datos observados en las estaciones de monitoreo, la línea gruesa indica los valores máximos registrados por la red.



# 5. Depósito atmosférico

Composición, pH y lluvia ácida

La transferencia de gases, líquidos y sólidos en la interfase de la atmósfera y el suelo, a través del depósito atmosférico, representa uno de los principales mecanismos de redistribución de los diversos compuestos químicos en la superficie de la Tierra. El agua de lluvia contiene compuestos primarios disueltos, derivados directamente de las partículas de aire que se originan en el polvo del suelo, el aerosol marino o las erupciones volcánicas, tales como el cloruro (Cl<sup>-</sup>), sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>) y calcio (Ca<sup>2+</sup>), así como también especies químicas secundarias, que se originan a partir de las emisiones gaseosas y reacciones posteriores en la atmósfera, que incluyen a los iones sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2</sup>-), nitrato (NO<sub>3</sub>-) y amonio (NH<sub>4</sub>+). La atmósfera representa una ruta de entrada de nutrientes, pero también de contaminantes en ecosistemas terrestres y acuáticos.

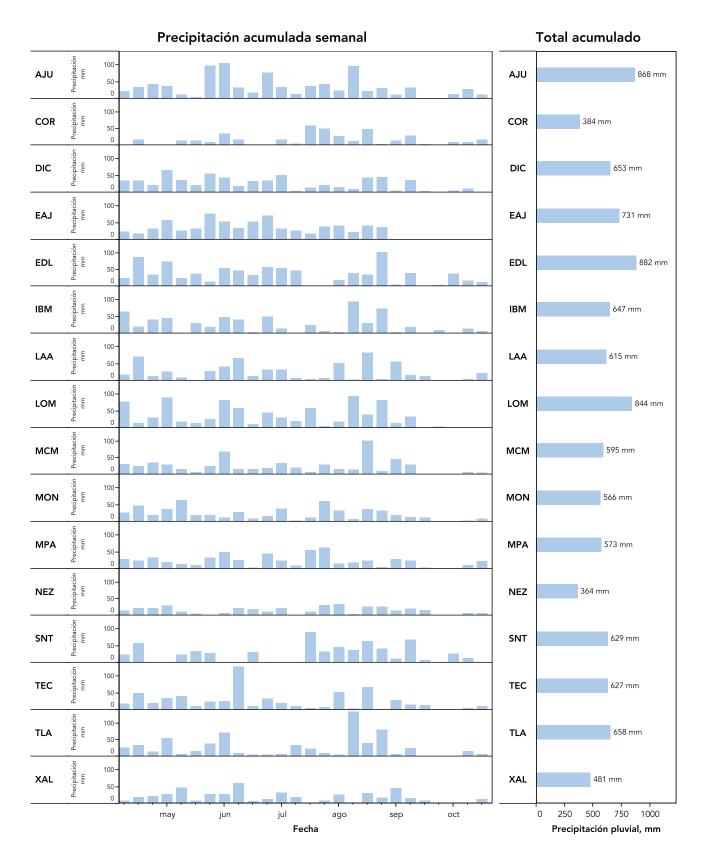
El monitoreo rutinario del depósito atmosférico forma parte de las actividades que realiza el programa de monitoreo de la calidad del aire. Durante la temporada de lluvia se colectan muestras del depósito atmosférico húmedo cada semana. La distribución de los sitios de muestreo otorga prioridad a las áreas de suelo de conservación, que es en donde se encuentran el mayor número de puntos de muestreo. Esto por la sensibilidad de la vegetación y los cuerpos de agua a los cambios en la composición natural de la precipitación pluvial y el pH provocados por la presencia de los contaminantes atmosféricos.

El aumento en la acidez del agua de lluvia ocurre de manera natural por la presencia de ácidos carbónico, nítrico, sulfúrico o clorhídrico. El ácido carbónico, se forma de la disolución del dióxido de carbono en el agua, confiriéndole un pH de 5.6. El dióxido de carbono es un componente permanente en la atmósfera, por lo tanto el agua de lluvia es naturalmente ácida. Las emisiones volcánicas son una fuente importante de ácidos sulfúrico y clorhídrico, mientras que la principal fuente de ácido nítrico es la oxidación en fase gaseosa del dióxido de nitrógeno. Por lo tanto, la presencia de ácidos naturales puede conferirle al agua de lluvia un pH entre 5 y 5.6. La producción antropogénica de ácidos, ya sea por emisión primaria o de transformación secundaria, provoca una mayor acidificación del agua de lluvia. Los ácidos que se producen en mayor cantidad son el sulfúrico, nítrico y clorhídrico. El ácido más abundante es el ácido sulfúrico, que se origina de la oxidación del dióxido de azufre emitido por la quema de combustibles fósiles y la quema de biomasa. El ácido nítrico se forma de la oxidación de los óxidos de nitrógeno emitidos por la combustión. El ácido clorhídrico se emite durante la quema de biomasa o de basura y en algunos procesos industriales.

Los ácidos pueden ser parcial o totalmente neutralizados por la presencia de sustancias básicas en el aire como el amoniaco, atenuando el daño asociado a la acidez. El depósito ácido no tiene un efecto directo en la salud humana, sin embargo, afecta severamente a los bosques, la agricultura, el agua de ríos y lagos, lo cual tiene un impacto importante en los servicios ambientales que aportan. También afecta a los materiales de construcción y puede causar daños invaluables en edificaciones históricas, monumentos y esculturas. Las sustancias ácidas pueden provocar daños en las raíces y hojas de las plantas. El daño en las raices puede ocurrir por la disolución y remoción de algunos nutrientes presentes en el suelo, esenciales para la planta, o generando nuevas especies químicas al reaccionar con minerales que contienen aluminio o hierro, que pueden dañar directamente a la raíz. En las hojas, los ácidos pueden disolver la capa cerosa de la cutícula y provocar daños directos. El daño a las plantas se puede agravar cuando además están expuesta a otros contaminantes presentes en el esmog fotoquímico, como el ozono y el nitrato de peroxiacetilo. El depósito ácido afecta tanto a los bosques como a los cultivos.

Los ácidos corroen fácilmente la arenisca, la piedra caliza, el mármol, el cobre, el bronce y el latón. Los efectos de la lluvia ácida y la contaminación atmosférica son evidentes en algunas edificaciones o monumentos históricos antiguos expuestos a la intemperie. Cuando el agua de lluvia contiene ácido sulfúrico disuelve la calcita para formar sulfato de calcio, el cual remueve el brillo de las superficies de mármol o caliza, crea una superficie áspera que facilita el depósito del hollín y otras sustancias contaminantes, ennegreciendo la superficie con el paso del tiempo.

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de las muestras de depósito atmosférico colectadas durante 2015 por la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).



**Figura 5.1.** Precipitación acumulada por semana y total, durante la campaña de 2015 en los diferentes sitios de muestreo que integran la Red de Depósito Atmosférico.

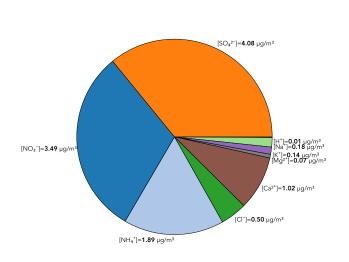
### Composición iónica

Las especies ionicas más abundantes en las muestras de depósito atmosférico fueron sulfato  $(SO_4^{2-})$ , nitrato  $(NO_3^{-})$ , amonio  $(NH_4^{+})$  y calcio (Ca<sup>2+</sup>), con contribuciones en menor proporción, pero significativas, de cloruro (Cl<sup>-</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) (Figura 5.2). En términos generales la abundancia relativa de los iones se encuentra en el siguiente orden sulfatos>nitratos>amonio>calcio>cloruro>sodio>potasio>magnesio>hidronio En la Figura 5.4 se presenta la composición iónica promedio para cada uno de los sitios de muestreo. El análisis de regresión entre la suma de aniones y de cationes reportó un valor de R<sup>2</sup> de 0.951, así como una cantidad de aniones menor en alrededor del 15%, con respecto a la de cationes (Figura 5.3), esto se debe a que en el análisis no se incluyeron a especies inorgánicas como el bicarbonato (HCO3-), ni las contribuciones de especies orgánicas como el oxalato  $(C_2O_4^2)$ , que se encuentran en menor proporción, pero contribuyen al balance iónico.

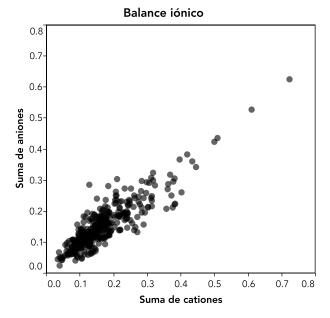
Los promedios máximos de sulfato se observaron en los sitios de IBM Legaria (IBM), Museo de la Ciudad de México (MCM) y Nezahualcóyotl (NEZ). En el caso de nitrato, lo promedios máximos se observaron en IBM, MCM y Laboratorio de

Análisis Ambiental (LAA). Para amonio los promedios máximos se registraron en IBM, NEZ y MCM. Para el ion hidronio (H<sup>+</sup>), principal responsable de la acidez en el agua de lluvia, las concentraciones máximas se observaron en los sitios de Milpa Alta (MPA), Ajusco (AJU) y Montecillo (MON).

Los iones sulfato y nitrato se encontraron en mayor proporción en todas las muestra analizadas, esto indica que existe una fuerte contribución de los procesos secundarios en la composición del depósito húmedo. Estos compuestos presentaron correlaciones altas (R2>0.7) en los sitios más alejados del área urbana. Por otra parte, el amonio es el catión más abundante y el principal responsable de la neutralización de los ácidos, se observó una relación entre la concentración de amonio con las concentraciones de sulfato y el nitrato en todas las muestras, con valores de R<sup>2</sup> entre 0.35 para Cerro del Tepeyac (TEC) y 0.88 en Ecoguardas Ajusco (EAJ). Se observó también que las estaciones del sur tuvieron mayores valores de R<sup>2</sup> en comparación con los sitios ubicados al norte, esta asociación podría estar relacionada con la contribución de masas de aire envejecidas al depósito atmosférico, a mayor envejecimiento mayor relación entre estos iones.



**Figura 5.2.** Composición iónica promedio de las muestras de depósito atmosférico colectadas durante la temporada de lluvia 2015.

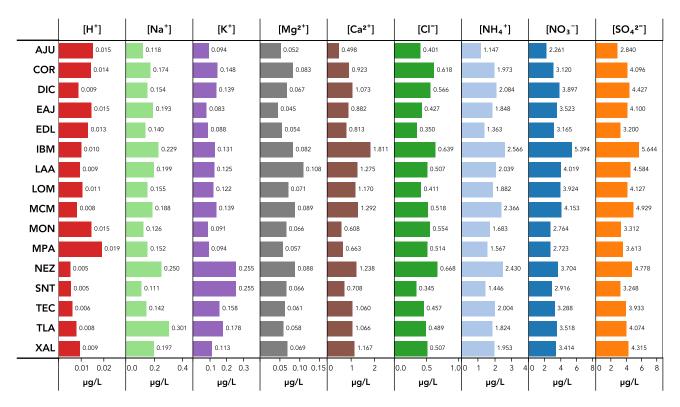


**Figura 5.3.** Relación entre la suma de las concentraciones de cationes y de aniones en las muestras de depósito atmosférico analizadas.

En todos los sitios se observó una asociación entre el ion calcio, con el sulfato y el nitrato, lo que sugiere que este catión de origen mineral, contribuye también en la neutralización de los ácidos. La relación más fuerte se observó en los sitios ubicados viento abajo, lo que proporciona indicios de la influencia del transporte de contaminantes sobre los procesos de formación de las partículas y el depósito, además de los procesos de envejecimiento de las masas de aire. Por otra parte, en los sitios Ex convento Desierto de los Leones (EDL), Lomas (LOM), MCM y MON se encontró una fuerte asociación entre los iones calcio y magnesio, ambos de origen mineral, y con menor intensidad con el cloruro y sodio, ésto sugiere una contribución del polvo del suelo o de actividades de construcción. La presencia de un enriquecimiento de potasio en los sitios de Nezahualcóyotl (NEZ) y San Nicolas Totoloapan (SNT) sugiere la contribución de quema de biomasa en ambos sitios. En los sitios EAJ, EDL, IBM y Tlalnepantla (TLA) se observó una fuerte correlación entre el cloruro y el sodio (R<sup>2</sup>>0.6).

Debido a que los iones se encuentran disueltos en la fase acuosa es difícil determinar con precisión los compuestos que formaban estos iones, sus fuentes primarias o los procesos que los originaron. Sin embargo, el estudio de las relaciones que guardan los componentes del depósito atmosférico, permite obtener información útil sobre las posibles fuentes y los procesos involucrados en la transferencia y depósito de los contaminantes emitidos a la atmósfera.

Otro de los parámetros evaluados en el depósito atmosférico fue la conductividad. La conductividad se refiere a la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica y se usa como una medida relativa de los cambios en su composición derivados de la incorporación de sustancias presentes en la atmósfera, incluyendo a los contaminantes atmosféricos. Entre mayor sea la conductividad, mayor será la cantidad de iones en disolución. Durante 2015 el promedio de la conductividad del agua de lluvia fue de 27.9 µS/cm, con un valor máximo de 38.2 µS/cm en el sitio IBM y un mínimo de 20.1 µS/cm en el sitio AJU.



**Figura 5.4.** Promedio de la concentración de cada uno de los iones analizados en las muestras de depósito atmosférico, para cada uno de los sitios de monitoreo de la Red de Depósito Atmosférico.

### Depósito

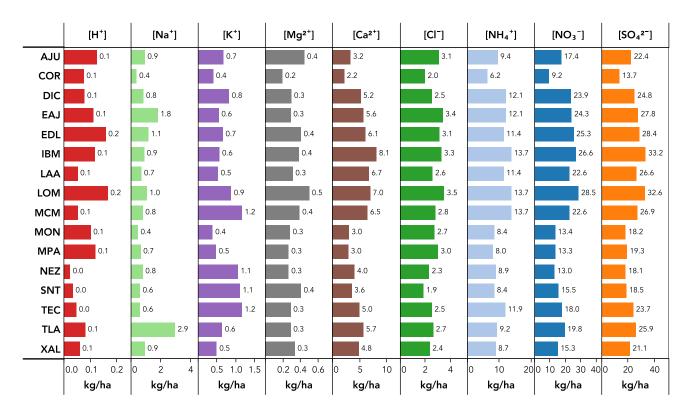
Durante la temporada de lluvia se depositaron en promedio 23.8 kg/ha de sulfato (7.9 kg de azufre/ha) en la Ciudad de México, la mayor cantidad se depositó en IBM con 33.2 kg/ha (11.1 kg/ha). Con respecto al nitrato el promedio fue de 19.3 kg/ha (4.4 kg de nitrógeno/ha) con un máximo en LOM de 28.5 kg/ha. Mientras que para amonio el promedio fue de 10.4 kg/ha (8.1 kg de nitrógeno/ha) con máximos de 13.7 kg/ha (10.7 kg de nitrógeno/ha) en LOM, IBM y MCM. El promedio para el depósito de nitrógeno inorgánico total fue de 12.5 kg/ha. Para el calcio el promedio fue de 5.0 kg/ha, con un máximo de 8.1 kg/ha en IBM. En el caso de cloruro el promedio fue de 2.5 kg/ ha con máximos de 3.5 kg/ha en LOM y 3.4 kg/ha en EAJ. Con respecto al año previo el promedio del depósito disminuyó en un 8% para sulfato, 16% en nitrato y 17% en amonio. Esto sugiere una reducción en las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y amoniaco durante 2015.

Los sitios de muestreo IBM y LOM reportaron los valores máximos de depósito atmosférico en

la mayoría de los iones analizados, mientras que los sitios CORENA (COR) y SNT registraron los valores mínimos del depósito.

**Tabla 5.1.** Promedio del depósito atmosférico en los sitios de la Red de Depósito Atmosférico durante la temporada de lluvia 2015

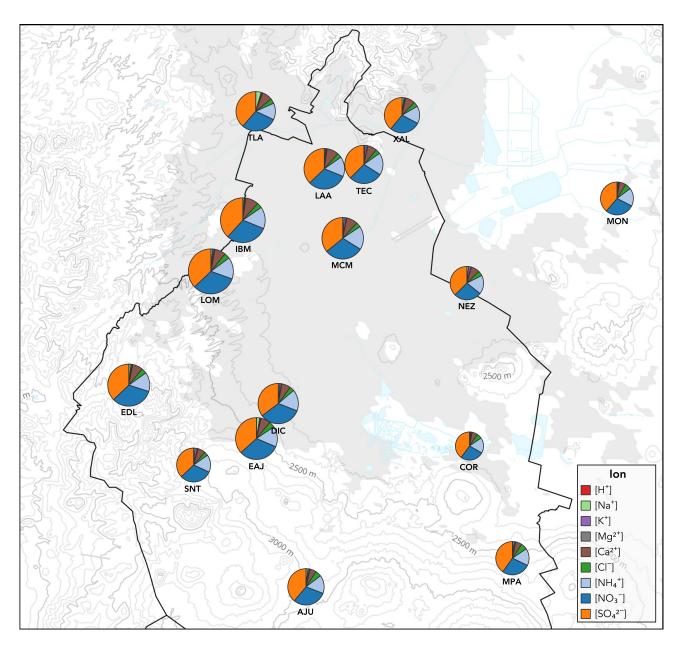
lon	Depósito kg/ha	%	
Hidronio	0.09	0.14	
Sodio	1.0	1.6	
Potasio	0.7	1.1	
Magnesio	0.3	0.5	
Calcio	5.0	7.9	
Cloruro	2.7	4.3	
Amonio	10.5	16.6	
Nitrato	19.3	30.5	
Sulfato	23.8	37.6	



**Figura 5.3.** Promedio del depósito acumulado para cada uno de los iones analizados durante la temporada de lluvia de 2015, en cada una de las estaciones de monitoreo de Red de Depósito Atmosférico.

Durante la temporada de lluvia la dirección predominante del viento fue de norte a sur, por lo que muchas de las especies observadas en el sur fueron originadas en el norte de la zona metropolitana. En la Figura 5.8 se ilustra de manera gráfica la proporción de la contribución de cada una de las especies ionicas al depósito atmosférico. En ella se observa que más del 80% del depósito corresponde a sulfato, nitrato, amonio y calcio. Las proporciones de las especies de mayor con-

tribución fue similar en todos los sitios. La mayor cantidad de depósito se registró en los sitios ubicados al centro y poniente, los sitios ubicados al sur y oriente presentaron las menores aportaciones. En los sitios con las mayores cantidades de depósito, como IBM, LOM, MCM, se observó una contribución importante de los iones asociados al polvo del suelo. Por otra parte, destaca la contribución del cloruro en los sitios ubicados al sur de la ciudad en el suelo de conservación.



**Figura 5.8.** Distribución espacial del depósito atmosférico por ion. El tamaño de cada uno de los gráficos es proporcional al valor del depósito total, cada una de las rebanadas del pay indica una especie iónica.

#### Lluvia ácida

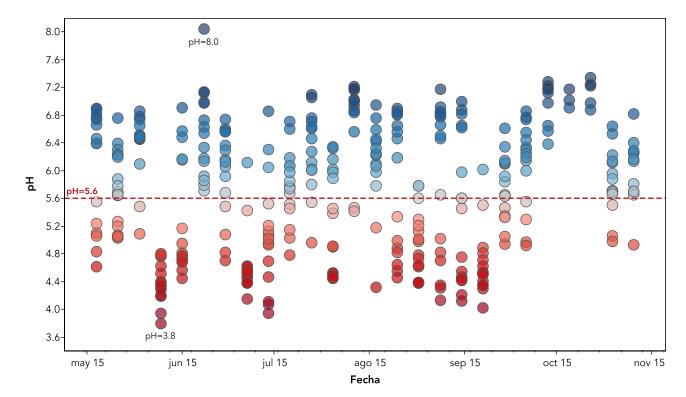
La lluvia ácida se observa cuando un ácido es emitido o producido en el aire y es depositado en las superficies a través de la lluvia. Los ácidos pueden tener diversos impactos a nivel ambiental que incluyen el daño a microorganismos, a las especies acuáticas, los bosques, la agricultura y los monumentos y estructuras.

Durante 2015 alrededor del 62 % de todas muestras reportaron un valor de pH menor a 5.6. En todos los sitios de muestreo se observaron muestras con valores de pH que corresponden a lluvia ácida. En la Figura 5.6 se muestran los valores de pH de cada una de las muestras recolectadas en la temporada de lluvia de 2015.

El valor mínimo de pH durante 2015 fue de 3.8 en el sitio de MPA al sureste de la Ciudad de México, el sitio se ubica en una zona rural en donde predomina la actividad agrícola. En COR, ubicado en Xochimilco, Ciudad de México, y MON se reportaron mínimos de pH con valores 3.9. El máximo de pH se observó en el sitio COR

con un valor de 8.0.

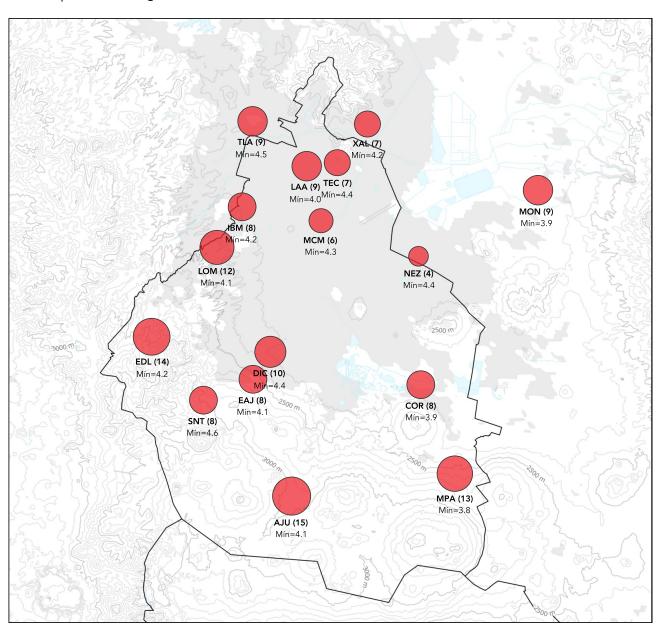
Debido a la dirección predominante de los vientos, los sitios ubicados viento abajo de las zonas de máxima emisión de los precursores de la lluvia ácida son los más afectados. En la Figura 5.7 se indica el número de muestras que reportaron valores que corresponden a lluvia ácida (pH<5.6), como se puede observar el mayor número de episodios ocurrieron al sur y al poniente de la Ciudad de México. La región de suelo de conservación, que es la más susceptible a los daños provocados por la lluvia ácida, es la que experimentó el mayor número de episodios durante esta temporada. En el sitio de EDL, ubicado dentro del Parque Nacional Desierto de los Leones, el 65% de las muestras analizadas reportaron un pH menor a 5.6. El sitio de Ajusco (AJU), localizado dentro del Parque Nacional Cumbres del Ajusco, reportó valores de pH correspondientes a lluvia ácida en el 58% de las muestras. El sitio de MPA. que se ubica en una de las regiones agrícolas más



**Figura 5.6.** Valores de pH de las muestras colectadas durante la temporada de lluvia de 2015. La línea punteada indica el valor del pH natural del agua de lluvia, los círculos corresponden a cada una de las muestras analizadas, el color azul indica valores de pH mayores al umbral para la lluvia ácida, los círculos en rojo indican la presencia de lluvia ácida.

importantes de la Ciudad de México, reportó valores de lluvia ácida en el 54% de las muestras recolectadas. El sitio COR, ubicado en una zona agrícola y muy cerca de la zona chinampera de Xochimilco, reportó valores de lluvia ácida en el 40% de las muestras. La presencia de lluvia ácida en el suelo de conservación puede tener efectos graves importantes en la salud de los bosques, en los cuerpos de agua que aún sobreviven en la región, además del impacto económico en las zonas de producción agrícola.

El suelo de conservación representa alrededor del 50% de la superficie de la Ciudad de México, actúa como un importante regulador del clima local y proporciona invaluables beneficios ambientales para los habitantes de la zona urbana. Sin embargo, los bosques endémicos de las sierras de Ajusco-Chichinautzin y de las Cruces, se encuentran bajo un grave estrés provocado por los elevados niveles de ozono, durante la temporada de ozono principalmente, y por la lluvia ácida en la temporada de lluvia.



**Figura 5.7.** Distribución del número de muestras en las que se detectó la presencia de lluvia ácida. Durante la temporada de lluvia se colectaron alrededor de 24 muestras por sitio. El mayor número de muestras ácidas se observaron en los sitios de muestreo ubicados al sur de la Ciudad de México.



# 6. Carbono negro

Resultados del análisis del carbono negro en muestras de PM<sub>2.5</sub>

#### El carbono negro

El carbono negro (traducido del término en inglés black carbon) es el principal componente de las partículas de hollín emitidas por los vehículos a diesel, también se encuentra en las partículas de hollín de los biocombustibles y de la quema de biomasa. El término suele emplearse para hacer referencia al hollín de carbón. El hollín de carbón (soot carbon) se identifica como una forma impura de carbono elemental con una estructura similar a la del grafito, se forma en la combustión con llama y en motores de combustión interna. Las partículas primarias de hollín, son esféricas con un tamaño entre 10-50 nanómetros (1 nm =  $10^{-9}$  m), no existen de manera individual en el aire ambiente, ya que después de su formación durante la combustión se agrupan inmediatamente para producir agregados que son su forma más estable. Más adelante se discutirá el uso del término carbono negro para referirse al hollín de carbón.

El carbono negro es un indicador universal de una mezcla variable de materiales presentes en las partículas emitidas por una gran variedad de fuentes de combustión, se encuentra junto con otras sustancias como los compuestos orgánicos (incluyendo los poliaromáticos), sulfatos y nitratos. El carbono negro tiene la propiedad de absorber la luz en todas las longitudes de onda y no transmitir ninguna, en consecuencia afecta la visibilidad y puede perturbar la distribución vertical de la temperatura en la atmósfera al absorber más radiación solar. Sirve como núcleo de condensación de nubes, es capaz de alterar las propiedades de las nubes y afectar el nivel de radiación que llega a la superficie. También aumenta la opacidad de la atmósfera a nivel regional. Se relaciona con problemas ambientales graves como la aceleración de la fusión glaciar al depositarse sobre la nieve. Recientemente, las observaciones y los modelos han sugerido que existe una contribución importante del carbono negro en el forzamiento positivo del clima. El forzamiento asociado al carbono negro en la región superior de la atmósfera, se estimó en hasta un 55% del forzamiento inducido por el CO<sub>2</sub> (Ramanathan & Carmichael, 2008).

Durante los últimos años, la comunidad científica se ha centrado en tratar de identificar los

impactos sobre la salud de determinados componentes o grupos de componentes asociados a diferentes categorías de fuentes de partículas PM<sub>2.5</sub>. La creciente evidencia de los impactos en la salud de los diferentes componentes específicos de PM<sub>2.5</sub> incluye pruebas sobre los efectos de la exposición a carbono negro. Sin embargo, los resultados de la investigación científica disponibles en la actualidad aún no son concluyentes y continúan proporcionando evidencia de que muchos componentes diferentes de las partículas finas, así como grupos de compuestos asociados a determinadas categorías de fuentes, están relacionados con algunos efectos adversos para la salud. En el caso específico del carbono negro la evidencia sobre sus efectos en la salud aún no es concluyente.

La OMS, en su reporte Health Effects of Black Carbon (WHO, 2012), indica que, de los estudios epidemiológicos revisados, los resultados de los efectos en la salud relacionados con la exposición a PM<sub>25</sub> también se asociaron con el carbono negro. Los estudios sobre los efectos sobre la salud a corto plazo indicaron que las asociaciones con el carbono negro son más robustas que las relacionadas con las PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>10</sub>, lo que sugiere que el carbono negro podría ser un mejor indicador de las sustancias nocivas provenientes de fuentes de combustión (especialmente de tráfico) que la concentración de masa de las partículas. Por otra parte, la evidencia de los estudios a largo plazo no es concluyente. En el caso de los estudios clínicos o toxicológicos no existe información suficiente para realizar una evaluación de las diferencias cualitativas entre los efectos de la exposición a carbono negro y a la masa de partículas. Sobre los estudios toxicológicos, la OMS reporta que la revisión de los resultados de los estudios disponibles, sugiere que el carbono negro puede no ser un componente directamente tóxico, pero puede funcionar como soporte para una amplia variedad de sustancias químicas derivadas de la combustión. Sin embargo, el reporte concluye indicando que la reducción en la exposición a las PM<sub>2.5</sub> que contienen carbono negro y otros materia-les relacionados con la combustión, debería inducir una reducción de los efectos a la salud.

El informe de la OMS recomienda que debe continuar empleandose la concentración de  $PM_{2.5}$  como el principal indicador para cuantificar la exposición humana a las partículas y los efectos en la salud, así como para estimar los beneficios de las medidas para reducir la exposición. Por otra parte, el uso del carbono negro como un indicador adicional puede ser útil en la evaluación de acciones locales para reducir la exposición de la población a las partículas derivadas de la combustión.

En términos operativos, a pesar de la importancia que tiene el material asociado al carbono en los aerosoles atmosféricos, no existe acuerdo sobre una terminología clara y sin ambigüedades para su cuantificación. Las definiciones utilizadas en la literatura científica se refieren a una propiedad específica de la fracción carbonosa o tienen que ver con el método que se utiliza para la medición. De acuerdo con Petzold et al. (2013), el término carbono negro se refiere a una descripción cualitativa útil cuando se hace referencia a la luz que absorben las sustancias carbonosas presentes en el aerosol, pero para aplicaciones cuantitativas el término requiere una aclaración sobre su estimación. En ausencia de un método para determinar de forma única la masa de carbono negro, recomienda que el término carbono negro se utilice como un término cualitativo y descriptivo cuando hace referencia al material que comparte algunas de las propiedades del carbono negro, en particular su composición y su interacción con la luz. Recomienda utilizar el término carbono negro equivalente (traducido del término en inglés equivalent Black Carbon, eBC) en lugar de carbono negro, para los datos obtenidos a partir de métodos ópticos. Recomienda también hacer mención del coeficiente de la sección transversal de absorción utilizado para convertir el coeficiente de absorción en concentración de masa de carbono negro.

A partir de 2015, como parte de las actividades que realiza la Dirección de Monitoreo Atmosférico para la caracterización de los componentes de las partículas suspendidas, se inició la caracterización del carbono negro en las muestras de PM<sub>2.5</sub> colectadas por la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) en las estaciones Coyoacán (COY), Merced (MER), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), Tlalnepantla (TLA), UAM Iztapalapa (UIZ) y Xalostoc (XAL). El análisis se realizó

con un transmisómetro Magee OT-21. El analizador OT-21 mide y compara la intensidad de la transmisión de la luz a 880 y 370 nm que pasa a través de un filtro con la muestra de partículas, contra la intensidad de un filtro en blanco para determinar la atenuación causada por la muestra. Los métodos ópticos asumen que la atenuación es proporcional a la cantidad de carbono negro presente en la muestra. La densidad de carbono negro (en µg/cm²) se determina dividiendo la atenuación relativa por el coeficiente de atenuación específica (en m²/g). La densidad se convierte en concentración en µg/m³, utilizando el área expuesta y el volumen de aire muestreado.

Algunos autores han sugerido que el coeficiente de atenuación es dependiente del tipo de aerosol y la edad del carbono negro (Liousse et al., 1993; Petzold et al., 1997). Esto podría representar una fuente importante de incertidumbre para los datos obtenidos con el OT-21. En el cálculo de la densidad del carbono negro se utilizó el coeficiente de atenuación sugerido por el fabricante de 16.6 m<sup>2</sup>/g para 880 nm. Por otra parte, algunos autores han reportado que la dispersión provocada por las capas superiores de las partículas depositadas en los filtros, pueden disminuir la absorción del haz de luz en las capas inferiores de la muestra, provocando una subestimación de la concentración de carbono negro. Este fenómeno puede ser importante en filtros con una carga importante de partículas. Para compensar este efecto se empleó la corrección propuesta por Virkkula et al. (2007) y Park et al. (2010).

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de carbono negro en las muestras de PM<sub>2.5</sub> obtenidas entre enero y diciembre de 2015. Las muestras de 24 horas se recolectaron cada seis días, de acuerdo al calendario de muestreo de la REDMA. Es importante mencionar que debido a la dificultad operativa para estimar con exactitud la masa de carbono negro, el método aplicado se encuentra en revisión contínua para su mejora, por lo tanto los datos podrían cambiar en futuras revisiones a partir de los resultados de evaluaciones comparativas. Los datos de carbono negro que se presentan en esa sección se reportan como carbono negro equivalente (CNe) de acuerdo a lo recomendado por Petzold et al. (2013) para mediciones con métodos ópticos.

#### Resultados del análisis de CNe en PM<sub>2.5</sub>

Las estadísticas básicas de los resultados del análisis de las muestras de 24 horas de  $PM_{2.5}$  colectadas durante 2015, se presentan en la Tabla 6.1. La Figura 6.1 muestra el comportamiento temporal de la concentración de carbono negro equivalente y de la concentración de  $PM_{2.5}$  en cada uno de los sitios de muestreo.

El sitio de Xalostoc (XAL) registró el promedio máximo para las concentraciones de CNe y de  $PM_{2.5}$ , con concentraciones promedio de 4.27 µg/m³ y 27.7 µg/m³, respectivamente. Mientras que el sitio de Pedregal (PED) registró los promedios mínimos con 1.55 µg/m³ y 18.8 µg/m³ para CNe y  $PM_{2.5}$ , respectivamente. La concentración máxima de CNe se observó en la estación XAL con un valor de 8.87 µg/m³. (ver Figuras 6.1 y 6.2)

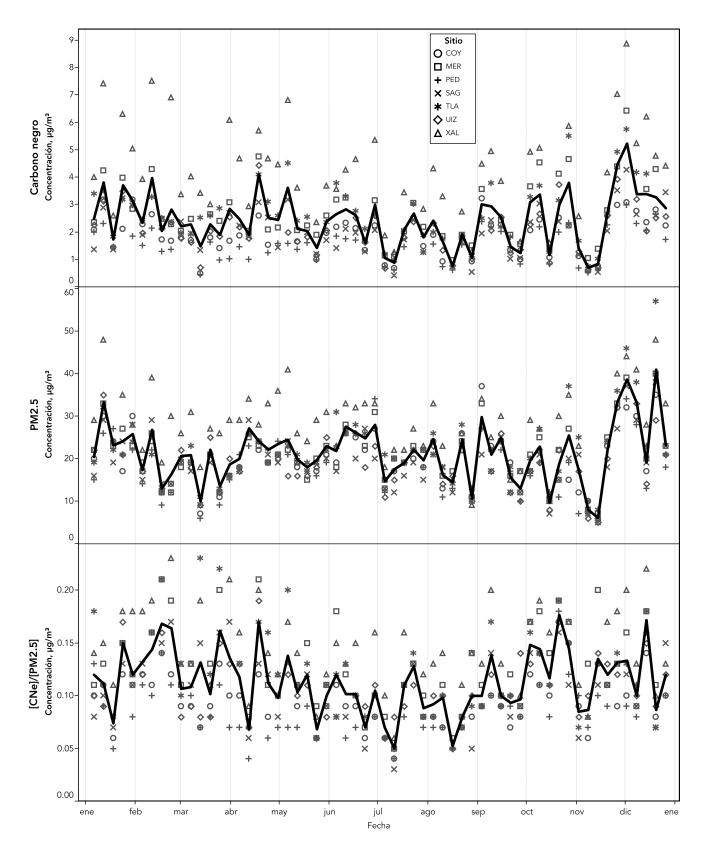
En la Tabla 6.1 se indica también la proporción entre las concentraciones de CNe y de PM<sub>2.5</sub> ([CNe]/[PM<sub>2.5</sub>]), esta relación corresponde a la contribución del componente a la masa total de partículas finas. El promedio de la relación [CNe]/[PM<sub>2.5</sub>] durante 2015 fue de 0.11, esto indica que alrededor del 11% de la masa total de PM<sub>2.5</sub> en la Ciudad de México corresponde a carbono negro, este resultado es congruente con los resultados reportados en otros estudios realizados en la ciudad. En XAL la contribución promedio de CNe fue del 15%, este sitio se encuentra dentro del corre-

dor industrial de Xalostoc, y cerca de la Vía Morelos (Antiqua Carretera a Pachuca) y la Autopista México-Pachuca, ambas fuertemente transitadas por vehículos de carga, transporte de pasajeros y vehículos particulares. Debido a que el carbono negro es emitido principalmente por la combustión de diesel, es de esperarse que la emisión de carbono negro sea mayor y además tenga una mayor contribución a la masa total de PM<sub>2.5</sub>. Por otra parte, el sitio de Pedregal (PED), ubicado al sur de la Ciudad de México, en donde existe una menor contribución de parte del tránsito vehicular o la industria y en donde la fuente más importante de contaminación es el acarreo de contaminantes desde el centro y norte de la ciudad, la contribución de CNe representa alrededor del 9% de la masa total de PM<sub>2.5</sub>. El centro de la ciudad, que generalmente presenta tránsito intenso durante la mayor parte del día, tiene una contribución del 13% de CNe a la masa total de  $PM_{2.5}$ .

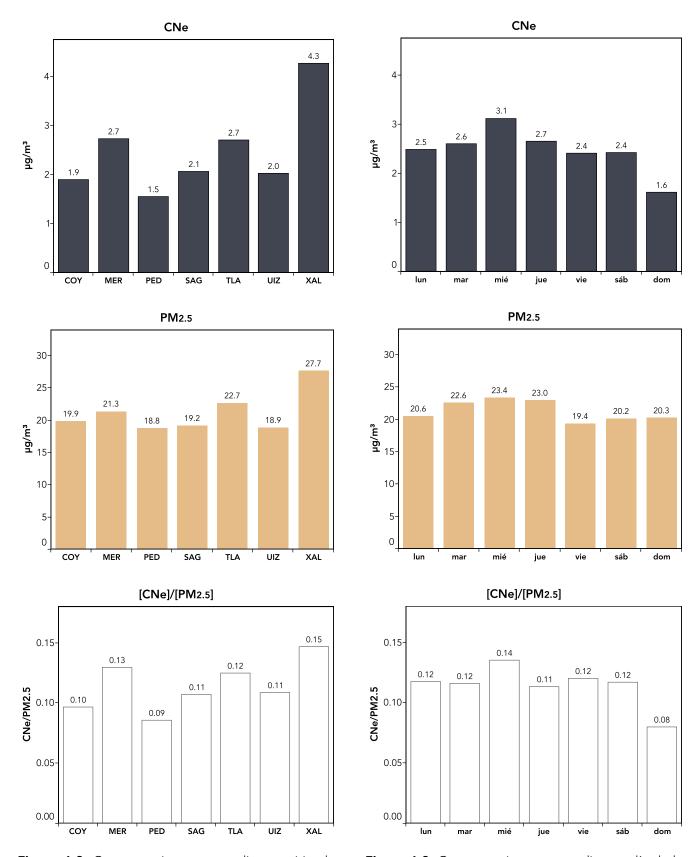
A pesar de que la REDMA realiza el muestreo de la fracción de las partículas  $PM_{2.5}$ , una vez cada seis días, en un año es posible obtener una muestra representativa para los diferentes días de la semana. A partir de los datos obtenidos se estimaron los promedios por día de la semana, los resultados indicaron que el miércoles tuvo el promedio máximo con un valor de 3.11  $\mu g/m^3$ , mientras que el domingo se observó el mínimo con 1.62  $\mu g/m^3$ .

**Tabla 6.1.** Estadísticas básicas de la concentración de carbono negro equivalente ([CNe]), partículas menores a 2.5 micrómetros ([PM $_{2.5}$ ]) y la relación entre el carbono negro equivalente y PM $_{2.5}$  ([CNe]/[PM $_{2.5}$ ]) Todas las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

			[CNe] µg/m³			PM <sub>2.5</sub> ] μg/m³			elación le]/[PM <sub>2.5</sub> ]		
Sitio	Clave	Prom ± Desv. Est.	Max	Min	Prom ± Desv. Est.	Max	Min	Prom ± Desv. Est.	Max	Min	
Coyoacán	COY	1.90±0.72	3.2	0.47	19.9±6.9	37	6	0.10±0.03	0.17	0.04	
Merced	MER	2.72±1.18	6.4	0.97	21.3±7.1	40	7	0.13±0.04	0.21	0.05	
Pedregal	PED	1.55±0.62	3.0	0.44	18.8±7.3	40	6	0.09±0.03	0.18	0.04	
San Agustín	SAG	2.06±0.82	4.3	0.42	19.2±6.6	38	5	0.11±0.03	0.17	0.03	
Tlalnepantla	TLA	2.71±1.17	5.8	0.71	22.7±8.5	57	8	0.13±0.04	0.23	0.05	
UAM Iztapalapa	UIZ	2.02±0.86	4.4	0.63	18.9±6.7	35	5	0.11±0.03	0.19	0.05	
Xalostoc	XAL	4.27±1.77	8.9	0.66	27.7±8.9	48	6	0.15±0.04	0.23	0.06	



**Figura 6.1.** Serie de tiempo de la concentración de carbono negro equivalente (CNe),  $PM_{2.5}$  y la relación CNe/ $PM_{2.5}$  durante 2015. Cada sitio de muestreo está representado por un símbolo, la línea continua representa el valor promedio calculado para todos los sitios de muestreo.



**Figura 6.2.** Concentraciones promedio por sitio de muestreo.

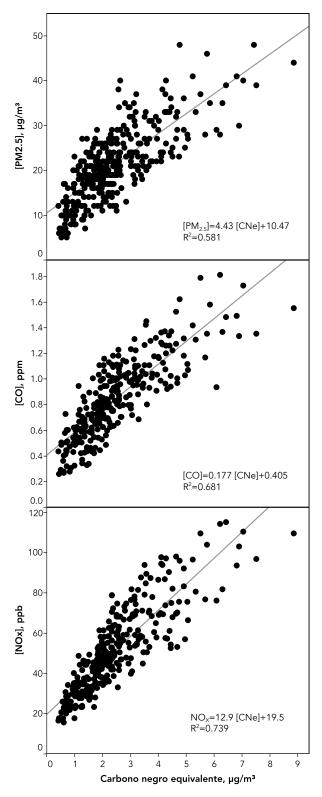
**Figura 6.3.** Concentraciones promedio por día de la semana.

El hecho de que los promedios máximos de CNe se registren el miércoles, es congruente con lo observado durante el análisis de los datos de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, en donde también el día miércoles se registraron los mayores promedios de ambos contaminantes, confirmando que para este año se presentó un cambio en los patrones vehiculares, que provocó un incremento significativo en las emisiones de algunos contaminantes primarios.

La relación CNe/PM<sub>2.5</sub> también incrementa los miércoles alcanzado hasta el 14% de la masa de PM<sub>2.5</sub>, indicando un incremento en la contribución de las emisiones vehiculares en la masa de las PM<sub>2.5</sub>. El domingo, a pesar de que la concentración de PM<sub>2.5</sub> no disminuye significativamente, la relación CNe/PM<sub>2.5</sub> decrece hasta un 8%, esto indica una disminución en la contribución de las emisiones provenientes de los vehículos automotores. El resto de los días el valor de la relación CNe/PM<sub>2.5</sub> se mantiene relativamente constante con promedios alrededor del 12%.

En términos temporales, las concentraciones máximas de CNe se presentaron a partir de la segunda quincena de noviembre, mientras que los menores valores se observaron durante julio y agosto. El incremento de la concentración de CNe durante el invierno está asociado con una disminución en la altura de capa de mezcla durante el invierno y el aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie, que atrapan la contaminación dentro de una capa cercana al suelo. La disminución en la concentración de CNe en julio y agosto podría estar vinculada con la reducción en el número de vehículos en circulación por las vacaciones de verano y el incremento en la precipitación pluvial.

Se observó también una correlación importante entre el CNe y la concentración de masa de  $PM_{2.5}$  ( $R^2$ =0.581, p<0.0001), lo que confirma su contribución directa a la masa total de las partículas finas. Por otra parte, el CNe tiene una buena correlación con la concentración de monóxido de carbono ( $R^2$ =0.681, p<0.0001) y de óxidos de nitrógeno ( $R^2$ =0.739, p<0.0001), confirmando su principal fuente en las emisiones de escape de los automóviles. Los resultados obtenidos de estas mediciones confirman la importante contribución de las emisiones vehiculares a la concentración de partículas suspendidas de origen primario.



**Figura 6.4.** Análisis de regresión entre la concentración de CNe y las concentraciones promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$ , monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO $_{\chi}$ ). Los datos corresponden a todos los sitios en los que se analizó el CNe y tenían información disponible para CO y  $NO_{\chi}$ .



# 7. Hidrocarburos precursores de ozono

Reporte técnico de la campaña 2012

# Resultados de la medición de hidrocarburos precursores del ozono durante la campaña de monitoreo de 2012

#### Introducción

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2014), anualmente se emiten a la atmósfera 360 mil toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV), de los cuales 20% son emitidos por los vehículos, 63.7% por las fuentes de área, 8.8% por la industria y 7.5% son de origen biogénico. Los COV desempeñan un papel importante en la producción del ozono troposférico. Una vez en la atmósfera, y en presencia de luz solar, los COV reaccionan con el radical hidroxilo (OH) y los óxidos de nitrógeno  $(NO_x)$  para formar ozono  $(O_3)$ , COV secundarios y aerosoles orgánicos secundarios. Estas reacciones están determinadas por la abundancia y composición de los COV. El diseño de estrategias para reducir la contaminación fotoquímica requiere conocer los mecanismos que conducen a la formación de altos niveles de O<sub>3.</sub> así como del conocimiento de las fuentes y su contribución a las emisiones de precursores. En el pasado se han realizado varios estudios para entender los procesos fotoquímicos y caracterizar los precursores de ozono. A pesar de la importancia que tienen los COV en la contaminación fotoquímica, en la Ciudad de México no se realiza la medición rutinaria de los principales precursores de ozono. Con el propósito de diseñar políticas adecuadas para reducir los niveles de ozono, la Dirección de Monitoreo Atmosférico inició en 2012 un programa para el análisis de algunas especies de hidrocarburos que forman parte de los COV, durante la temporada de ozono. Los objetivos y diseño del programa se describen en Jaimes y Retama (2013). En este trabajo se presentan los resultados del análisis de 22 hidrocarburos medidos por cromatografía de gases, en los sitios Merced (MER) y Pedregal (PED), en donde se registran los niveles máximos de precursores y las mayores concentraciones de ozono, respectivamente, en la primera campaña de monitoreo que comprendió el periodo de marzo a junio de 2012.

#### Método

Durante la campaña de monitoreo 2012 se instalaron dos cromatógrafos continuos de gases en las estaciones de monitoreo Merced y Pedregal. Ambos sitios fueron seleccionados durante las campañas extensivas de monitoreo MC-MA-2003 y MILAGRO 2006 encabezadas por los Doctores Luisa T. Molina y Mario Molina. Las mediciones de VOC se realizaron utilizando cromatógrafos Syntech Spectras GC955 611/811 (Synspec BV, Groningen, Netherlands). Para abarcar los hidrocarburos C<sub>2</sub>-C<sub>12</sub> este instrumento está diseñado como un cromatógrafo de gases (GC) doble, cada cromatógrafo cuenta con un sistema de preconcentración. Los hidrocarburos C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> se preconcentran en una trampa de Carbosieves SIII a 5 °C, posteriormente son desorbidos térmicamente y se separan utilizando una combinación de dos columnas, una columna capilar y una columna capilar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/KCl PLOT, el análisis se realizó utilizando un detector de fotoionización y otro de ionización a la flama. Los hidrocarburos C<sub>6</sub>- $C_{12}$  se preconcentraron en Tenax GR, para posteriormente ser desorbidos térmicamente y separados en una columna estándar DB-1, el análisis se realizó con un detector de fotojonización. Se obtuvieron promedios de 30 minutos. La calibración de los tiempos de retención y de las concentraciones se realizó con una curva de calibración para cada especie analizada, usando una mezcla estándar con 51 especies (Spectra Gases Company, NJ, USA) con concentraciones en el intervalo de 3 a 15 ppb. La mayoría de los compuestos exhiben curvas de calibración con coeficientes de correlación superiores a 0.9. La precisión y los tiempos de retención se verificaron en dos ocasiones durante la campaña utilizando el mismo estándar. Cada cromatograma se revisó posteriormente para identificar desviaciones en los tiempos de retención y posibles problemas en la integración de los picos. Cuando se detectaron cambios se calcularon nuevamente los valores.

#### Resultados y discusión

#### Concentraciones

En las Tablas 7.1 y 7.2 se muestran las concentraciones de los 22 COV analizados en cada una de las estaciones de monitoreo los meses de febrero a junio de 2012. En general la estación Merced reportó mayores concentraciones que la estación Pedregal. Las especies más abundantes en el aire ambiente fueron propano, n-butano, eteno, isopentano, etano, propeno, i-butano y tolueno.

En la mayoría de los casos las concentraciones reportadas son menores a las observadas en estudios anteriores (Arriaga et al., 1997; Blake & Rowland, 1997; Mugica et al., 2002; Velasco et al., 2007; Sosa et al., 2009; Wöhrnschimmel et al., 2010), esto a pesar del crecimiento de la ciudad y del parque vehicular. Estos resultados son consistentes con la disminución en las concentraciones observada por Arriaga-Colina et al. (2004) y Velasco et al. (2007). Es importante destacar que en el caso de la mayoría de los alquenos (olefinas) analizados se encontró un ligero incremento con respecto a los resultados obtenidos en estudios previos. Estos compuestos están fuertemente asociados a las emisiones de los escapes de los vehículos.

La abundancia relativa de los alcanos de bajo peso molecular como el propano, n-butano e ibutano se atribuyó principalmente a la fuga de gas LP proveniente de las numerosas fuentes urbanas (Blake y Rowland, 1995; Gasca et al., 2004). De acuerdo con PEMEX la mezcla de gas LP que se utiliza en México contiene un 61.4% de propano, 26.4% de butano, 12% de i-butano y 0.2% de gasolinas naturales (Secretaría de Energía, 2012). Debido a la baja reactividad de los alcanos su proporción se mantiene relativamente constante en la atmósfera durante el día una vez emitidos a la atmósfera, esto se pudo observar en las tasas promedio de sus concentraciones en el aire ambiente. En Merced los porcentajes de propano, nbutano e i-butano son 59.5%, 30.6% y 9.9%, respectivamente; mientras que en Pedregal son 61.7%, 27.5% y 10.8%, respectivamente.

La presencia de etano en el aire ambiente se asocia con fugas de gas natural y también puede encontrarse en pequeñas concentraciones en el gas LP y las emisiones vehiculares (Vega et al., 2000; Gasca et al. 2004; Velasco et al., 2008). En general, los alcanos presentan una baja reactividad frente al OH, pero por su elevada concentración pueden tener una contribución significativa en la producción de ozono (Blake & Rowland, 1995; Sosa et al., 2009).

El i-pentano, eteno y propeno están asociados directamente a las emisiones vehiculares (Vega et al., 2000). El tolueno es el hidrocarburo aromático que se encuentra en mayor abundancia en el aire ambiente y proviene de emisiones vehiculares, tanto de combustión como evaporativas, industriales y de otras fuentes (Vega et al., 2000; Mugica et al., 2002; Wöhrnschimmel et al., 2006; Sosa et al., 2009).

Dentro de los hidrocarburos analizados estuvieron el 1,3-butadieno y el benceno, si bien ambos presentaron concentraciones relativamente bajas, son compuestos tóxicos de gran riesgo para la salud humana. El 1,3-butadieno es un compuesto con un elevado potencial para la formación de ozono y es un conocido cancerígeno, su presencia es de particular importancia en términos de la química atmosférica y la salud. El Reino Unido ha establecido un Air Quality Objective para el 1,3-butadieno de 2.25 µg/m³ (1 ppb) para el promedio anual. En este estudio se obtuvo un valor promedio para los 5 meses de 1.12 ppb, en el sitio Merced, mientras que en Pedregal fue de 0.44 ppb. El hecho de que para este contaminante se observe un aumento en la concentración, con respecto a las mediciones realizadas en campañas previas (Arriaga-Colina et al., 2004; Velasco et al., 2007) puede tener implicaciones serias para la salud. Por otra parte, el benceno tiene una baja participación en la producción de ozono, pero está relacionado con problemas en el sistema nervioso y el desarrollo de leucemia (Ortiz et al., 2002). La comunidad europea ha fijado una concentración promedio anual de 10 µg/m³ (3.1 ppb). Los resultados obtenidos durante el periodo de estudio indican que este contaminante podría estar por debajo de este nivel.

**Tabla 7.1.** Estadística descriptiva de la concentración de hidrocarburos observadas en la estación de monitoreo Merced.

	n	Promedio ± desviación estándar	Max	Min
propano	3242	55.80 ± 47.90	395.2	6.3
n-butano	3242	22.31 ± 17.93	135.2	2.4
eteno	3241	$12.14 \pm 8.06$	51.9	0.5
isopentano	3241	$10.65 \pm 8.81$	107.4	0.7
etano	3242	$8.85 \pm 5.66$	47.9	1.6
propano	3242	8.59 ± 3.53	29.9	2.2
tolueno	3258	$7.26 \pm 3.83$	46.9	1.3
i-butano	3242	$7.20 \pm 5.87$	45.4	0.7
n-hexano	3259	$3.06 \pm 2.81$	31.9	0.2
2,2,4-trimetilpentano	3260	1.89 ± 1.31	11.1	0.1
1-buteno	3194	1.51 ± 1.03	7.3	0.1
benceno	3260	$1.22 \pm 0.50$	3.7	0.4
1,3-butadieno	3214	$1.12 \pm 0.70$	4.6	0.1
m,p-xileno	3260	$1.09 \pm 0.67$	11.7	0.1
isopreno	3232	$1.09 \pm 0.63$	5.3	0.1
trans-2-buteno	3119	$0.98 \pm 0.75$	6.5	0.1
cis-2-buteno	3241	$0.94 \pm 0.76$	5.9	0.1
o-xileno	3260	$0.85 \pm 0.62$	11.3	0.1
etilbenceno	3260	$0.61 \pm 0.45$	7.2	0
1,2,4-trimetilbenceno	3256	$0.55 \pm 0.42$	5.8	0.1
2,4-dimetilpentano	3242	$0.46 \pm 0.35$	3.3	0.1
3-metilpentano	3257	$0.43 \pm 0.27$	2.4	0

**Tabla 7.2.** Estadística descriptiva de la concentración de hidrocarburos observadas en la estación de monitoreo Pedregal.

	n	Promedio ± desviación estándar	Max	Min
propano	3507	34.28 ± 27.67	253.435	2.030
n-butano	3507	$11.86 \pm 9.20$	64.700	0.660
eteno	3471	$8.98 \pm 5.84$	35.170	0.755
etano	3507	$6.54 \pm 3.69$	25.610	0.905
propeno	3507	$4.77 \pm 2.42$	15.460	0.815
i-butano	3507	$4.64 \pm 3.55$	25.460	0.250
tolueno	3581	$3.47 \pm 1.93$	17.175	0.330
isopentano	3506	$3.21 \pm 2.83$	64.495	0.030
2,2,4-trimetilpentano	3580	$2.11 \pm 1.50$	28.610	0.175
n-hexano	3579	$1.42 \pm 0.84$	5.760	0.080
1-butano	3352	$0.86 \pm 0.67$	4.475	0.065
trans-2-butano	3507	$0.79 \pm 0.70$	5.715	0.055
benceno	3581	$0.77 \pm 0.33$	2.185	0.110
cis-2-buteno	3505	$0.54 \pm 0.47$	4.440	0.050
1,3-butadieno	3624	$0.44 \pm 0.26$	1.719	0.062
isopreno	3456	$0.44 \pm 0.27$	3.605	0.045
m,p-xileno	3581	$0.42 \pm 0.30$	3.835	0.025
3-metilpentano	3568	$0.41 \pm 0.24$	1.815	0.030
2,4-dimetilpentano	3563	$0.35 \pm 0.27$	1.910	0.025
etilbenceno	3577	$0.34 \pm 0.27$	2.420	0.015
o-xileno	3571	$0.32 \pm 0.27$	2.815	0.020
1,2,4-trimetilbenceno	3381	$0.22 \pm 0.22$	1.825	0.020

#### Correlaciones entre los diferentes compuestos

La mayoría de los hidrocarburos identificados tuvieron una correlación importante con el CO (Tabla 7.3). Se sabe que en áreas urbanas el CO es emitido casi exclusivamente durante la combustión en los motores de los vehículos, por lo tanto su asociación con los hidrocarburos puede ser un importante indicador de un origen similar (Barletta et al., 2002; Baker et al., 2008; Parrish et al., 2009; Von Schneidemesser et al., 2010). De manera general la correlación entre el CO y los hidrocarburos fue más fuerte en el sitio de Merced, que en Pedregal, esto se puede explicar por la mayor influencia de las emisiones vehiculares en la primera. En Merced, el CO mostró una fuerte correlación (R>0.9) con el benceno, eteno, propeno, 1-buteno y 1,3-butadieno, mientras que en Pedregal solo el benceno y el eteno tuvieron una fuerte correlación con el CO. Es importante mencionar que además de las emisiones, la dinámica meteorológica (temperatura, altura de mezclado y viento) determinó las variaciones temporales de corto plazo de las concentraciones de los contaminantes. Esta modulación en la variabilidad diurna influye en la correlación con el CO, por lo que la correlación pudiera no ser un indicador inme-diato para discriminar entre fuentes (Blake & Rowland, 1995; Barletta et al., 2002).

Por la importancia de la contribución de las emisiones de las especies asociadas al gas LP, en la Tabla 7.3 se presentan también los valores de correlación de los hidrocarburos contra el propano. Es de esperar que el n-butano e i-butano tengan una fuerte correlación (R>0.9) con el propano, ya que son los principales componentes del gas LP. Sin embargo, se observó también una fuerte correlación (R>0.9) con el propeno en ambos sitios y una correlación importante (R>0.85) con el i-buteno, cis-2-buteno, trans-2-buteno y 1,3-butadieno. La presencia de olefinas en el gas LP puede estar asociada a los procesos de refinación del gas (Morganti et al., 2013). Estas olefinas pueden aumentar la contribución del gas LP en la producción fotoquímica del ozono en la Ciudad (Gasca et al., 2004).

Las emisiones vehiculares son la principal fuente de emisión de compuestos aromáticos (Vega et al., 2000). Con excepción del tolueno, existe una buena correlación con el CO en ambos sitios.

La menor correlación con el tolueno se debe a que existen otras fuentes diferentes a las vehiculares para este compuesto (Vega et al., 2000). Resulta interesante observar que de todos los hidrocarburos analizados, el benceno fue el que presentó la mejor correlación con el CO (MER=0.954, PED=0.904).

El 1,3-butadieno es producto de las emisiones de escape de los vehículos a gasolina (Mugica et al., 2003, Fujita et al. 2003; Velasco et al., 2007), sin embargo, también es emitido por fuentes que utilizan gas LP como combustible (Chen et al., 2001; Gasca et al., 2004; Adam et al., 2011). En este estudio se encontró que en el sitio de Merced, el 1,3-butadieno está fuertemente correlacionado (R>0.9) con compuestos asociados a las emisiones vehiculares como el CO, benceno y etilbenceno, mientras que en Pedregal, se observa una correlación importante (R>0.85) con los componentes del gas LP.

#### Variaciones diurnas

Con excepción de la temporada de lluvia (junio-septiembre) durante el resto del año la meteorología en la cuenca de México tiene ciclos diurnos bien definidos. Durante las noches, el enfriamiento radiativo del suelo provoca la disminución en la altura de la capa de mezcla, esto significa un menor volumen de dilución y mayor estabilidad atmosférica. En el periodo nocturno la velocidad de viento disminuye considerablemente, reduciendo la capacidad dispersiva de la atmósfera. Debido a que la actividad vehicular es más intensa durante la mañana (5:00 a 9:00), las concentraciones de los contaminantes asociados a los escapes alcanzan los máximos en ese periodo. Con la salida del sol, la altura de mezcla aumenta hasta alcanzar un máximo después del mediodía, y las concentraciones de los contaminantes disminuyen al mínimo por el aumento en el volumen de dilución y el ingreso gradual de aire relativamente limpio impulsado por la brisa de valle. Por la tarde el movimiento convectivo de la atmósfera contribuye a la dispersión de la contaminacion. Las variaciones de temperatura y de presión a lo largo del día también afectan los perfiles de la velocidad de viento, generalmente se observa un mínimo en la mañana y un máximo alrededor de la hora de la puesta del sol.

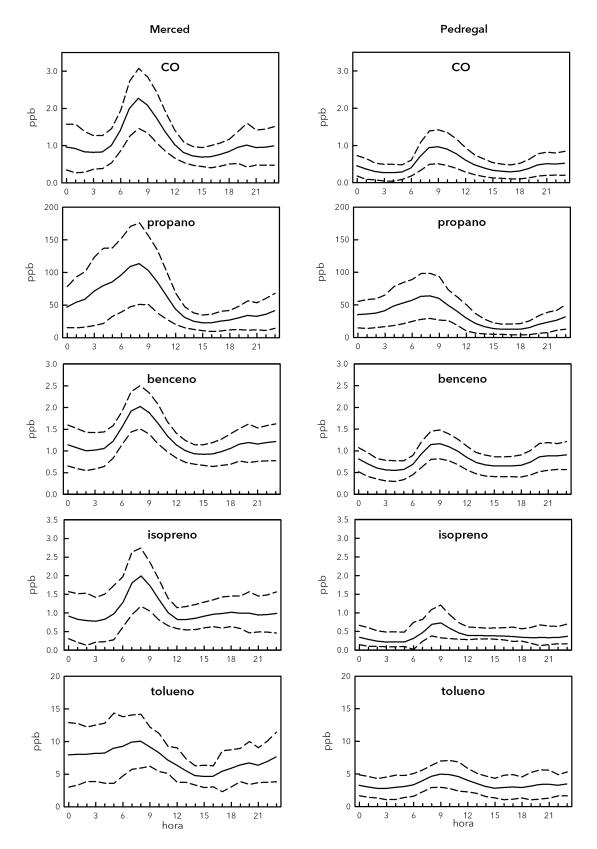
**Tabla 7.3.** Coeficientes de correlación entre la concentración de hidrocarburos con respecto a la concentración de benceno y propano.

	Me	erced	Pedregal				
	со	Propano	со	Propand			
benceno	0.954	0.824	0.904	0.621			
eteno	0.942	0.788	0.907	0.653			
propeno	0.939	0.915	0.794	0.910			
1-buteno	0.914	0.905	0.756	0.896			
1,3-butadieno	0.914	0.830	0.795	0.877			
3-metilpentano	0.890	0.854	0.892	0.646			
2,2,4-trimetilpentano	0.868	0.782	0.842	0.638			
i-butano	0.859	0.983	0.686	0.981			
n-butano	0.851	0.980	0.692	0.980			
1,2,4-trimetilbenceno	0.848	0.785	0.831	0.731			
propano	0.840		0.650				
2,4-dimetilpentano	0.837	0.760	0.864	0.686			
cis-2-buteno	0.831	0.863	0.675	0.877			
isopreno	0.808	0.713	0.711	0.536			
i-pentano	0.792	0.755	0.708	0.562			
trans-2-buteno	0.791	0.795	0.639	0.876			
ethylbenceno	0.783	0.744	0.871	0.671			
ethano	0.780	0.842	0.882	0.798			
m,p-xileno	0.732	0.727	0.811	0.693			
o-xileno	0.707	0.693	0.831	0.693			
hexano	0.613	0.604	0.866	0.665			
tolueno	0.483	0.560	0.759	0.633			

Cerca de las montañas que rodean la cuenca, durante las horas de la mañana, un flujo de pendiente propicia una mayor dispersión que en el centro de la ciudad (de Foy et al., 2005). La temperatura también tiene una fuerte componente estacional, al igual que las temperaturas de inversión. En los meses de diciembre y enero se registran las temperaturas menores y aumenta la frecuencia de las inversiones térmicas de superficie, mientras que en el mes de mayo se alcanza la temperatura máxima y disminuye la frecuencia de las inversiones radiativas. La meteorología es el factor principal que modula los ciclos diurnos de la mayoría de los contaminantes del aire, más aún si estos tienen una baja reactividad química, como en el caso de los alcanos. La influencia de esta variación diurna asociada a los factores meteorológicos se observó en los perfiles de las concentraciones de la mayoría de los hidrocarburos, que presentaron máximos durante la mañana entre las 7:00 y las 9:00, cuando la altura de mezcla, la temperatura y la velocidad de viento son mínimas. Mientras que los mínimos ocurren por la tarde cuando la altura de mezclado, la temperatura y la

velocidad del viento son máximos, favoreciendo una mayor dilución y dispersión. Por la tarde se observó un pico de menor intensidad después de las 18:00, asociado con la disminución en la altura de la capa de mezcla, así como un aumento en el tránsito vehicular. Esta variación diurna fue observada también por Velasco et al. (2007). En la Figura 7.1 se muestran los perfiles de los promedios horarios para algunos de los hidrocarburos analizados.

Las concentraciones de los VOC asociados a las emisiones vehiculares, tienen patrones similares al CO con incrementos a partir de las 4:00, con el inicio de la actividad vehicular en la ciudad, y alcanzan su máximo entre 8:00 y 9:00 de la mañana. Durante la mañana el tránsito vehicular se dirige preferentemente de la periferia hacia el centro y por la tarde es en sentido inverso, esto coincide con las horas pico del tránsito. El resto del día se observa una escasa disminución en la cantidad de vehículos en circulación. Además de las condiciones de ventilación y de la altura de mezclado, las variaciones diurnas dependen también de los cambios en las emisiones vehiculares



**Figura 7.1.** Perfiles promedio de algunos hidrocarburos. La línea continua corresponde al promedio, las líneas punteadas indican la desviación estándar.

en los alrededores de los sitios de medición. Con la expansión de la capa de mezcla disminuyen las concentraciones, hasta alcanzar un mínimo despues del mediodía, cuando la altura de la capa de mezcla es máxima. Por la tarde, cuando la intensidad del tránsito aumenta, se observó nuevamente un incremento en la concentración de CO y los hidrocarburos, sin embargo, las concentraciones son menores que en la mañana debido principalmente a la dispersión causada por el viento y una altura de capa de mezcla mayor que en la mañana. Algunos compuestos presentes en las emisiones vehiculares de escape o evaporativas, como el 2,2,4-trimetilpentano y el benceno, son relativamente estables en la atmósfera y tienen pocas fuentes adicionales, lo que hace que estos compuestos sean ideales para emplearse como indicadores del tránsito vehicular.

El agotamiento químico influye en la variabilidad diurna de los hidrocarburos reactivos. Algunas especies como el isopreno, los isómeros del buteno y el 1,3-butadieno, tienen una mayor reactividad frente al radical OH y el O<sub>3</sub>, que los alcanos y aromáticos (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000). Esto explica porque se observó una drástica disminución en la concentración de los hidrocarburos más reactivos, que coincide con las horas en las que incrementa el ozono, con respecto a aquellos hidrocarburos queson más estables químicamente. La influencia del agotamiento químico es más notoria en el sitio de Pedregal, ya que en este sitio un porcentaje importante de hidrocarburos son producto del transporte desde el centro y norte de la ciudad, lo que permite un mayor tiempo de reacción. La tasa de pérdida de los hidrocarburos reactivos fue mayor durante los meses de primavera que en los meses de invierno.

En la Ciudad de México las fugas de gas natural y gas LP contribuyen significativamente a la abundancia relativa del etano, propano, butano e i-butano en el aire ambiente (Blake & Rowland 1995; Sosa et al., 2009). Estos compuestos no presentan un agotamiento químico en la atmósfera por su baja reactividad frente al radical OH, por lo que en el corto plazo existe una diferencia mínima entre el promedio de vida atmosférico y el tiempo de residencia (Yang et al., 2005), por lo tanto la variación del contaminante durante el día, está modulada principalmente por la altura de la capa de mezcla y la ventilación. Durante las primeras

horas del día se observó un aumento gradual en las concentraciones de estos alcanos, Velasco et al. (2007) atribuyen este incremento a las emisiones derivadas de las actividades domésticas previas al inicio de la jornada laboral, como el baño y la cocción de alimentos. A lo anterior, se podría agregar también, la contribución de los compuestos presentes en la capa residual que se mezclan con las emisiones frescas durante las primeras horas del día, mientras deciende la altura de mezclado.

El tolueno fue el hidrocarburo aromático más abundante observado durante el periodo de estudio, con una variación diurna distinta a los otros compuestos aromáticos. A diferencia del benceno, el tolueno reporta concentraciones nocturnas elevadas, con un pico máximo entre las 6:00 y las 8:00 de la mañana. El tolueno es un componente de la gasolina y se emite a través de las emisiones evaporativas o de los gases del escape. También se encuentra en las emisiones de una gran variedad de fuentes como vehículos a diesel, actividades de asfaltado, desengrasado, pinturas y barnices, tintas y solventes usados en las artes gráficas (Vega et al., 2000; Mugica et al., 2002). Las altas concentraciones durante la noche pueden relacionarse con actividades industriales, el asfaltado y reparación de vialidades.

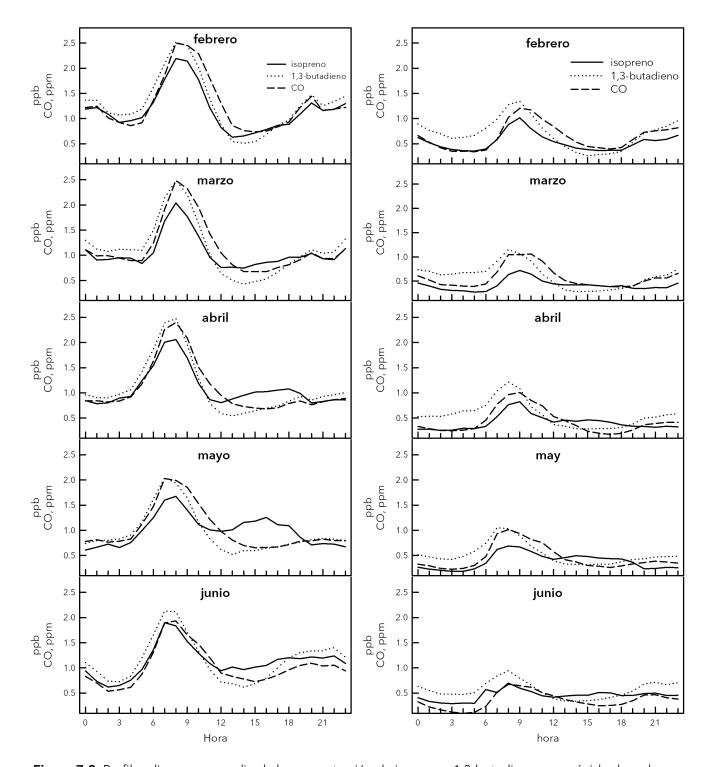
El caso del isopreno merece un análisis adicional. Se sabe que en ambientes urbanos las emisiones vehiculares son una fuente importante de isopreno (Borbon et al., 2001; Barletta et al., 2002; Guo et al., 2004; Barletta et al., 2005). Sin embargo, el isopreno es un hidrocarburo que generalmente se utiliza como un indicador de emisiones biogénicas (Guenther et al., 1993; Reimann et al., 2000, Borbón et al., 2001; Fujita et al., 2003), ya que es producido en las hojas de algunas plantas a través de la acción catalítica de la enzima isopreno sintetasa, estimulada por la luz y la temperatura (Tingey et al., 1979; Sharkey et al., 2008; Duncan et al., 2009). Esta dependencia de la luz y temperatura propicia una mayor producción de isopreno en los días cálidos y soleados (Yokouchi, 1994; Fuentes et al., 2000; Lerdau et al., 2013). Dominguez-Taylor et al. (2007) observaron durante un estudio realizado en la Ciudad de México, una estacionalidad en la producción de isopreno en las especies abundantes de los bosques que rodean a la ciudad. Mientras que el encino siempre verde tiene su máxima emisión al final de la época cálida en mayo, las coníferas tienen su máximo de emisión en octubre. Si bien se ha reportado que no todas las plantas emiten isopreno (Monson et al.; 2013), algunas que son comunes en los parques urbanos de la Ciudad de México como el Eucalyptus sp. y algunas especies de Ficus, y en las zonas forestales, como algunas especies de Quercus y Cupressus, son productoras importantes de isopreno (Benjamin et al.; 1996; Dominguez-Taylor et al., 2007; Padhy & Varshney, 2005; Monson et al., 2013). La contribución de las fuentes antropogénicas y biogénicas del isopreno han sido estudiadas en otras áreas urbanas y suburbanas (Borbon et al., 2001; Barletta et al., 2002; Badol et al., 2004; Guo et al., 2004; Barletta et al., 2005; Yang et al., 2005; Filella & Peñuelas, 2006; Baker et al., 2008).

En términos atmosféricos la importancia del isopreno está relacionada con su fotoreactividad y la importante contribución a la producción del ozono (Chameides et al., 1988; Duncan et al., 2010). En la Ciudad de México son pocos los estudios sobre la concentración del isopreno y su variabilidad diurna en el aire ambiente. Velasco et al. (2007) y Bon et al. (2011) analizaron los perfiles diurnos del isopreno, sin embargo, no identificaron el pico característico del isopreno biogénico en un sitio urbano al sureste de la Ciudad de México y atribuyeron las emisiones de este compuesto principalmente a los vehículos automotores. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que en la Ciudad de México el isopreno podría tener una contribución importante de tipo biogénico.

El análisis de los perfiles diarios del isopreno indicó que durante el mes de febrero las variaciones en sus concentraciones corresponden muy bien con las del monóxido de carbono y de los hidrocarburos relacionados con las emisiones vehiculares. Sin embargo, a partir de marzo se observó el desarrollo de un pico durante la tarde entre las 14:00 y las 18:00, que aumentó en los meses siguientes. Lo anterior se explica por las variaciones en la temperatura y la luz solar. Se sabe que la emisión de isopreno depende de la luz y la temperatura, por lo tanto es de esperarse que la contribución biogénica sea mínima en febrero y aumente en los siguientes meses a medida que

incrementa la temperatura, la intensidad de la radiación solar y la duración del día. Este comportamiento se observó en los dos sitios estudiados, la intensidad del pico biogénico fue mínima en febrero y máxima en mayo.

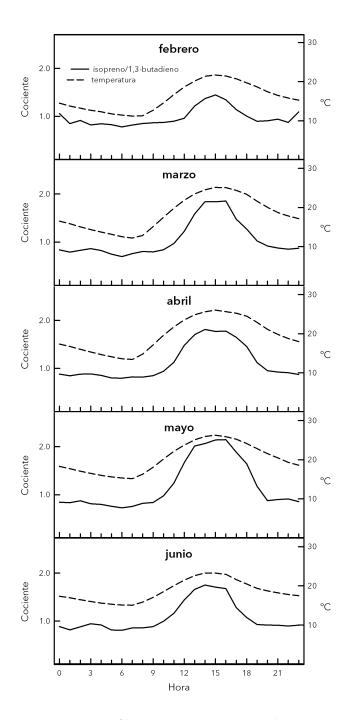
Con el propósito de diferenciar la contribución biogénica de la antropogénica en el isopreno, se realizó la comparación del compuesto contra un trazador vehicular. Algunos hidrocarburos que tienen una fuerte correlación con el CO, como el benceno, etileno, etino y el 1,3-butadieno, se utilizan frecuentemente como indicadores de emisiones vehiculares en ambientes urbanos (Borbon et al., 2001; Wagner & Kuttler, 2014; Velasco et al., 2007). Asumiendo que el aire representa una mezcla relativamente homogénea de contaminantes, una proporción constante entre el isopreno y cualquier trazador de emisiones vehiculares sería el indicador de una fuente común de emisión, independientemente de las variaciones en la altura de la capa de mezcla. Sin embargo, la reactividad del isopreno frente al OH (101x10<sup>-12</sup> cm<sup>3</sup> moléculas<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) dificulta el uso de un indicador adecuado, ya que su agotamiento químico puede generar una sobrestimación de la contribución antropogénica, cuando se utilizan trazadores con menor reactividad. De los hidrocarburos que están fuertemente asociados a las emisiones vehiculares y que fueron analizados en este estudio, solo el 1,3-butadieno tiene una reactividad suficientemente alta (66.6x10<sup>-12</sup> moléculas-1 s-1) que permitiría minimizar la sobreestimación de las emisiones antropogénicas con respecto al resto de los compuestos analizados (Borbon et al., 2001; Reimann et al., 2000). Aun cuando el isopreno es 1.3 veces más reactivo que el 1,3-butadieno, su variabilidad diurna también exhibe un agotamiento químico. En la Figura 7.2 se presentan las variaciones diurnas del promedio horario de las concentraciones de isopreno, CO y 1,3-butadieno para cada mes. Durante las mañanas se observaron los picos asociados a las emisiones vehiculares en los tres compuestos. Después de las 9:00 es evidente el agotamiento químico en el isopreno y 1,3-butadieno. Aún cuando en los meses de febrero y marzo fue difícil identificarlo, en los meses de abril a junio después del mediodía fue evidente la presencia del perfil típico con forma de campana asociado al isopreno biogénico.



**Figura 7.2.** Perfiles diurnos promedio de la concentración de isopreno, 1,3-butadieno y monóxido de carbono, para cada mes de febrero a junio, en los sitios de Merced (izquierda) y Pedregal (derecha).

Para separar la contribución biogénica de la antropogénica del isopreno, se calculó el cociente isopreno/1,3-butadieno. Cuando ambas especies provienen de las emisiones vehiculares el cociente se mantuvo relativamente constante, un aumento en el valor del cociente indica una posi-

ble contribución biogénica de isopreno. La diferencia de reactividades entre ambas especies sobreestima la contribución antropogénica, sin embargo, la cantidad de isopreno en ambos sitios fue suficiente para compensar esta diferencia y permitió distinguir la contribución biogénica.



**Figura 7.3.** Perfiles diurnos promedio del cociente isopreno/1,3-butadieno (línea contínua) y de la temperatura ambiente (línea punteada) para la estación de monitoreo de Merced.

En la Figura 7.3 se muestran los perfiles horarios del cociente isopreno/1,3-butadieno junto con la variación de la temperatura ambiente en el sitio de Merced. En la gráfica se observa la influencia de la temperatura en la contribución biogénic-

a. Los datos sugieren que la emisión de isopreno aumentaba cuando la temperatura ambiente fue superior a los 15°C. Se observa que a medida que avanzan los meses, aumenta la temperatura y en consecuencia la relación isopreno/1,3-butadieno es mayor. Febrero reportó la relación más baja, ya que a menor temperatura y radiación solar se esperaba una menor concentración de isopreno biogénico, sin embargo, con el incremento de la temperatura y la duración del fotodía, en la primavera, también aumentó la concentración de isopreno biogénico. Lo anterior confirmó que la contribución de la fracción biogénica fue mayor durante los meses más cálidos.

Estos resultados tienen implicaciones importantes para la calidad del aire, ya que el incremento en la emisión de isopreno biogénico ocurre precisamente en las horas de mayor actividad fotoquímica, por lo que la alta reactividad del isopreno frente al OH podría intensificar significativamente la producción de ozono. Además, las mejores condiciones para la emisión de isopreno biogénico se presentan entre marzo y mayo, cuando la temperatura y la intensidad de la radiación son máximas.

#### Índice fotoquímico

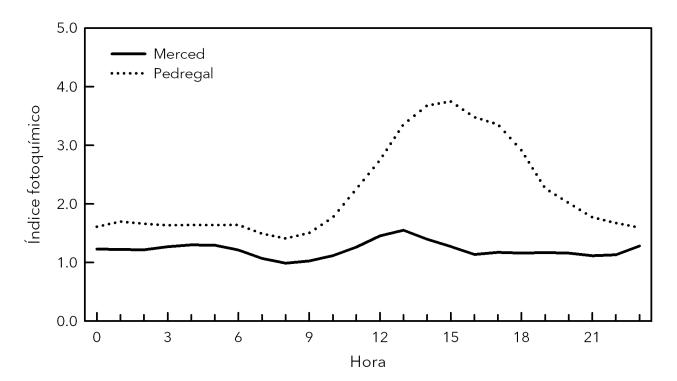
Además de los procesos de mezclado y dilución, el agotamiento químico tiene un efecto en la modulación de la variación diurna que depende de la reactividad de los hidrocarburos frente a especies oxidantes como el radical OH. Las velocidades iniciales de reacción con el OH son diferentes para cada especie, mientras que los alquenos reaccionan con mayor facilidad, los alcanos apenas reaccionan.

La velocidad inicial de reacción determina el tiempo de vida del compuesto en la atmósfera, ya que los compuestos más reactivos serán consumidos a mayor velocidad que los menos reactivos a medida que la parcela de aire se aleja de la fuente de origen de los hidrocarburos. En consecuencia, los cambios en las concentraciones pueden utilizarse como un indicador del tiempo de exposición de la masa de aire al radical OH y proporcionar información sobre el grado de proceso fotoquímico y del enveje-cimiento que ha sufrido una parcela de aire.

En algunos estudios se ha utilizado la relación entre dos compuestos originados por una misma fuente pero con diferente reactividad para identificar cambios relativos a la composición y el envejecimiento de las masas de aire (Roberts et al., 1984). Esta relación es menos sensible a la dilución y mezclado que la concentración absoluta y es útil para identificar diferencias fotoquímicas. Asumiendo que dos especies tienen el mismo origen, el valor de la relación entre una especie poco reactiva con respecto a otra más reactiva será relativamente constante cerca de la fuente y aumenta a medida que la concentración de la especie más reactiva disminuye durante el proceso fotoquímico. Tseng et al. (2009a, 2009b) propone el uso del cociente de dos especies con un mismo origen, pero con diferente reactividad frente al OH, para definir un índice fotoquímico simple que permita estimar el grado de la reacción fotoquímica y del envejecimiento de una masa de aire. Este índice fue utilizado para observar el proceso fotoquímico en algunas estaciones de monitoreo de Taiwan.

El sur de la Ciudad de México registra con frecuencia las concentraciones máximas de

ozono, esto se debe a que durante el día la dirección predominante del viento en las horas de mayor actividad fotoquímica es de norte a sur. Las fuentes más importantes de los precursores de ozono se ubican al norte de la ciudad. El sitio Merced se localiza muy cerca del centro de la ciudad, mientras que el sitio Pedregal se ubica a 14 km al suroeste del centro. Por la distancia y el tiempo de transporte de una parcela de aire, se espera que las variaciones diurnas de los hidrocarburos al sur de la ciudad presenten un mayor agotamiento químico que las estaciones ubicadas al norte. En este estudio se utilizó el cociente etilbenceno/1,2,4-trimetilbenceno para estimar el índice fotoquímico, ambos compuestos son emitidos principalmente por fuentes vehiculares. La reactividad del etilbenceno frente al OH es de  $7.5 \times 10^{-12} \, \text{cm}^3 \, \text{moléculas}^{-1} \, \text{s}^{-1}$ , mientras que el 1,2,4trimetilbenceno es de 32.5x10<sup>-12</sup> cm<sup>3</sup> moléculas<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>. Dado que el 1,2,4-trimetilbenceno tiene un tiempo de vida más corto frente al OH, su concentración disminuirá con más rapidez que la del etilbenceno, por lo tanto, entre más grande sea la trayectoria recorrida, mayor será el valor del índice. En la Figura 7.4 se muestran los promedios



**Figura 7.4.** Compración del índice fotoquímico en las estaciones Merced (línea continua) y Pedregal (línea punteada).

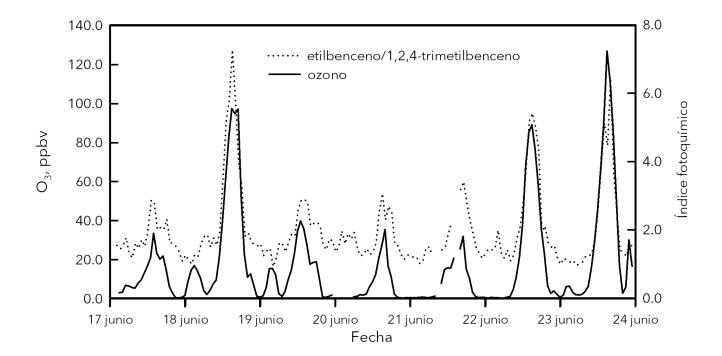
horarios de los índices fotoquímicos calculados para los sitios Merced y Pedregal. Mientras que en Merced el índice presenta pocas variaciones durante el día, en Pedregal aumenta considerablemente por la tarde con un máximo entre las 15:00 y 16:00, disminuyendo al anochecer. El aumento en el valor del índice durante la tarde confirma que la masa de aire en Pedregal tiene un mayor envejecimiento que la del sitio Merced. En el sitio Pedregal el índice fotoquímico tiene un perfil muy similar al ozono durante el día (Figura 7.5) y una correlación moderada (R=0.4, p<0.0001) durante el periodo de estudio.

#### Reactividad

En términos de calidad del aire la característica más importante de los hidrocarburos es su capacidad de producción de ozono. En ambientes urbanos la formación de ozono inicia con la reacción del compuesto orgánico con el radical hidroxilo (OH) para formar un radical peroxi, el cual oxida el NO a NO<sub>2</sub>. El ozono se forma de la fotólisis del NO<sub>2</sub> en presencia de O<sub>2</sub>. La formación del radical peroxy es el paso limitante en la pro-

ducción de ozono, por lo tanto la velocidad de consumo del radical OH es una manera indirecta de estimar la velocidad de reacción para la formación del ozono. La reactividad de los hidrocarburos con el OH es una buena aproximación de su contribución relativa a la formación del ozono (Velasco et al., 2007; Dusanter et al., 2009). El producto de la concentración del compuesto y la constante de reacción con el OH (kOH) indica cuanto del radical OH reacciona con dicho compuesto.

En estudios recientes realizados en la Ciudad de México se encontró que el OH tiene una reactividad promedio de 25 s<sup>-1</sup> durante la mayor parte del día y 120 s<sup>-1</sup> en las horas de máxima emisión por la mañana, la cual es varias veces mayor que los valores reportados para cualquier ciudad de Estados Unidos. También se encontró que la tasa media de producción de ozono a partir del radical HO<sub>2</sub> es de 50 ppbv-h que es 5 veces mayor a la de Nueva York (Shirley et al., 2006). Por otro lado, Dusanter (2009) reportó una concentración de 4.6x10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup> para OH y 1.9x10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup> para HO<sub>2</sub>, estos resultados indican que la atmósfera de la Ciudad de México tiene una gran capacidad oxidativa y los procesos fotoquímicos involucrados



**Figura 7.5.** Comparación del índice fotoquímico y la concentración de ozono en la estación Pedregal durante el 17 de junio y el 24 de junio.

**Tabla 7.4.** Reactividad con respecto al radical OH y concentraciones promedio durante las horas de mayor tránsito vehicular de la mañana (5:00-9:00). Los números a la derecha del símbolo  $\pm$  indican la desviación estándar de la media. Los coeficientes de reacción con el radical OH están reportados a 298 K and 1 atm (cm³ molécula $^{-1}$  s $^{-1}$ )×10 $^{-12}$ .

	Coeficiente de	Reactividad o	Concentración (ppbv)					
	OH	Merced	Pedregal	Merced	Pedregal			
propeno	26.3	7.86 ± 2.49	4.47 ± 1.49	12.13 ± 7.86	6.91 ± 4.47			
eteno	8.52	$4.05 \pm 1.94$	$2.48 \pm 1.36$	$19.29 \pm 4.05$	11.81 ± 2.48			
isopreno	101	$3.86 \pm 2.03$	$1.35 \pm 0.96$	$1.55 \pm 0.81$	$0.54 \pm 0.39$			
1,3-butadieno	66.6	$3.06 \pm 1.20$	$1.09 \pm 0.49$	$1.86 \pm 0.73$	$0.67 \pm 0.30$			
propano	1.15	$2.87 \pm 1.64$	$1.68 \pm 0.95$	$101.50 \pm 2.87$	59.42 ± 1.68			
trans-2-buteno	64	$2.65 \pm 1.45$	$2.34 \pm 1.27$	$1.68 \pm 0.92$	$1.49 \pm 0.81$			
n-butano	2.54	$2.47 \pm 1.34$	$1.27 \pm 0.68$	$39.49 \pm 2.47$	20.31 ± 1.27			
cis-2-buteno	56.4	$2.31 \pm 1.33$	$1.37 \pm 0.77$	$1.66 \pm 0.96$	$0.99 \pm 0.55$			
1-buteno	31.4	$1.96 \pm 0.89$	$1.11 \pm 0.57$	$2.54 \pm 1.15$	$1.44 \pm 0.74$			
i-pentano	3.7	1.52 ± 1.15	$0.42 \pm 0.39$	16.73 ± 12.61	$4.64 \pm 4.28$			
tolueno	5.96	$1.39 \pm 0.63$	$0.58 \pm 0.28$	$9.47 \pm 4.31$	3.98 ± 1.91			
m,p-xileno	18.95	$0.73 \pm 0.27$	$0.26 \pm 0.15$	$1.57 \pm 0.58$	$0.55 \pm 0.33$			
hexano	5.61	$0.73 \pm 0.59$	$0.24 \pm 0.13$	$5.27 \pm 4.29$	1.77 ± 0.91			
1,2,4-trimetilbenceno	32.5	$0.71 \pm 0.38$	$0.27 \pm 0.21$	$0.89 \pm 0.48$	$0.33 \pm 0.26$			
i-butano	2.19	$0.70 \pm 0.38$	$0.43 \pm 0.23$	$12.96 \pm 7.09$	$8.02 \pm 4.20$			
o-xylene	13.7	$0.42 \pm 0.19$	$0.14 \pm 0.10$	$1.25 \pm 0.57$	$0.42 \pm 0.30$			
2,2,4-trimetilpentano	3.6	$0.25 \pm 0.13$	$0.23 \pm 0.13$	$2.79 \pm 1.49$	$2.63 \pm 1.50$			
etilbenceno	7.1	$0.16 \pm 0.08$	$0.08 \pm 0.05$	$0.93 \pm 0.45$	$0.44 \pm 0.30$			
2,4-dimetilpentano	5.2	$0.09 \pm 0.05$	$0.06 \pm 0.04$	$0.73 \pm 0.41$	$0.50 \pm 0.32$			
etano	0.26	$0.09 \pm 0.04$	$0.06 \pm 0.03$	$14.45 \pm 6.52$	$9.17 \pm 4.09$			
3-metilpentano	5.7	$0.09 \pm 0.04$	$0.07 \pm 0.04$	$0.63 \pm 0.30$	$0.50 \pm 0.27$			
benceno	1.23	$0.05 \pm 0.02$	$0.03 \pm 0.01$	$1.70 \pm 0.53$	$0.88 \pm 0.37$			

en la formación de la contaminación atmosférica están limitados por estos radicales (Volkamer *et al.*, 2010). Velasco *et al.* (2007) encontró que entre las 6:00 y las 9:00 el eteno, propeno, propano y el n-butano tienen la mayor contribución a la pérdida de OH, con valores de 4.26 s<sup>-1</sup>, 3.84 s<sup>-1</sup>, 3.61 s<sup>-1</sup> y 3.13 s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Con el propósito de evaluar la contribución de cada uno de los hidrocarburos a la pérdida de OH, se calculó el promedio de las concentraciones de cada compuesto para las horas de mayor acumulación de precursores de ozono, entre las 5:00 y las 9:00 de la mañana. Para cada especie se estimó el valor de reactividad utilizando los coeficientes publicados por Atkinson (1994, 1997). Los resultados indicaron que la mayor contribución a la pérdida de OH corresponde al propeno, eteno, isopreno, propano, butano y los isómeros del buteno. Esto es congruente con lo reportado por Velasco et al. (2007). Si bien solo se analizó un pequeño conjunto de los compuestos orgánicos

volátiles, se confirmó que las emisiones antropogénicas continúan como las principales responsables de la producción de ozono en la Ciudad de México. Los alquenos asociados a las emisiones vehiculares dominan la contribución a la pérdida de OH, tanto por su concentración como por su reactividad. Los alcanos propano y n-butano, asociados al gas LP, tienen una baja reactividad, sin embargo, por sus altas concentraciones en el aire ambiente tienen una contribución fotoquímica significativa. Estos ha-llazgos son consistentes con otros estudios que han documentado la importancia de la contribución de los compuestos antropogénicos a la pér-dida de OH en la Ciudad de México (Blake & Rowland, 1995; Shirley et al., 2006; Velasco et al., 2007; Velasco et al., 2008). El isopreno tiene una contribución a la pérdida de OH significativamente mayor que la reportada en otros estudios, esto se debe posiblemente a la presencia de isopreno biogénico durante los meses más cálidos.

#### Principales hallazgos

- 1. Los resultados de este proyecto indicaron una reducción en las concentraciones de la mayoría de los hidrocarburos analizados, con respecto a campañas similares realizadas en años previos, esto a pesar del crecimiento de la ciudad y su parque vehicular. Sin embargo en el caso de los alquenos se ha observado un incremento.
- 2. Los hidrocarburos asociados con el gas LP, propano y n-butano, fueron las especies más abundantes. A pesar de la baja reactividad de los componentes del gas LP su presencia puede contribuir significativamente a la tasa de pérdida del OH y por lo tanto a la producción de ozono.
- 3. La identificación de sustancias tóxicas como el benceno y el 1,3-butadieno puede ser de preocupación en términos de salud. Las concentraciones fueron relativamente bajas, sin embargo, es importante mantener la vigilancia de su presencia en el aire ambiente.
- 4. La identificación del isopreno con un origen posiblemente biogénico, otorga una relevancia especial a las emisiones asociadas con la ve-

- getación en la producción de ozono. Mientras que durante la mañana predominó la contribución antropogénica del isopreno, después del mediodía se observó una contribución de origen biogénico, ésta fue mayor en los días con mayor temperatura.
- 5. La presencia de isopreno biogénico durante las horas de mayor actividad fotoquímica podría intensificar la producción de ozono y favorecer episodios con concentraciones elevadas por la tarde, principalmente durante los meses cálidos y soleados de la temporada de ozono.
- 6. En términos de su concentración y reactividad el propeno y eteno fueron las especies con mayor contribución a la reactividad frente al OH, sin embargo, el isopreno, el 1,3-butadieno y los isómeros del buteno tuvieron una contribución importante.
- 8. Por la configuración de la cuenca y los vientos predominantes, las masas de aire en el sitio de Pedregal presentan un mayor envejecimiento que en Merced.

### Referencias

- Adam, T. W.; Astorga, C.; Clairotte, M.; Duane, M.; Elsasser, M.; Krasenbrink, A.; Larsen, B. R.; Manfredia U.; Martinia G.; Monteroa L.; Sklorzc M.; Zimmermannb R.; Perujoa A. (2011). Chemical analysis and ozone formation potential of exhaust from dual-fuel (liquefied petroleum gas/gasoline) light duty vehicles. Atmos. Environ., 45(17), 2842–2848.
- Atkinson, R. (1994). Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds, J. Phys. Chem. Ref. Data, 2, 11–216.
- Atkinson, R. (1997). Gas-phase tropospheric chemistry of volatile organic compounds. J. Chem. Ref. Data, 26, 215-290.
- Arriaga-Colina, J. L.; West J. J.; Sosa, G.; Escalona, S. S.; Ordúñez, R. M.; Cervantes, A. M. D. (2004). Measurements of VOCs in Mexico City (1992-2001) and evaluation of VOCs in the emissions inventory. Atmos. Environ., 38, 2523-2533.
- Badol, C.; Borbon, A.; Locoge, N.; Léonardis, T.; Galloo, J. C. (2004). An automated monitoring system for VOC ozone precursors in ambient air: development, implementation and data analysis. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 378(7).
- Baumgardner, D.; Raga, G. B.; Kok, G.; Ogren, J.; Rosas, I.; Báez, A.; Novakov, T. (2000). On the evolution of aerosol properties at a mountain site above Mexico City, J. Geophys. Res., 105(D17), 22243–22253.
- Baker, A. K.; Beyersdorf, A. J.; Doezema, L. A., Katzenstein, A.; Meinardi, S.; Simpson, I. J.; Blake, D. R.; Rowland, F. S. (2008). Measurements of nonmethane hydrocarbons in 28 United States cities. Atmos. Environ., 42, 170e182.
- Barletta, B.; Meinardi, S.; Simpson, I. J.; Khwaja, H. A.; Blake, D. R.; Rowland, F. S. (2002). Mixing ratios of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Karachi, Pakistan. Atmos. Environ., 36(21), 3429–3443.
- Barletta, B.; Meinardi, S.; Rowland, F. S.; Chan, C. Y.; Wang, X.; Zou, S.; Yin Chan, L.; Blake, D. R. (2005). Volatile organic compounds in 43 Chinese cities. Atmos. Environ., 39(32), 5979–5990.
- Blake, D. R. & Rowland, F. S. (1995). Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico city air quality. Science (New York, N.Y.), 269(5226), 953–6.
- Benjamin, M.T.; Sudol, M.; Bloch, L.; Winer, A.M. (1996). Lowemitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. Atmos. Environ., 30, 1437-1452.
- Bon, D. M.; Ulbrich, I. M.; de Gouw, J. A.; Warneke, C.; Kuster, W. C.; Alexander, M. L.; Baker, A.; Beyersdorf, A. J.; Blake, D.; Fall, R.; Jimenez, J. L.; Herndon, S. C.; Huey, L. G.; Knighton, W. B.; Ortega, J.; Springston, S.; Vargas, O. (2011) Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution, Atmos. Chem. Phys., 11, 2399-2421.
- Borbon, A.; Fontaine, H.; Veillerot, M.; Locoge, N.; Galloo, J.C.; Guillermo, R. (2001). An investigation into the traffic-related fraction of isoprene at an urban location. Atmos. Environ., 35 (22), 3749–3760.
- Chameides, W. L.; Lindsay, R. W.; Richardson, J.; Kiang, C. S. (1988). The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. Science, 241(4872), 1473-1475.
- Chandra, S.; Ziemke, J. R.; Duncan, B. N.; Diehl, T. L.; Livesey, N. J.; Froidevaux, L. (2009). Effects of the 2006 El Niño on tropospheric ozone and carbon monoxide: Implications for dynamics and biomass burning. Atmos. Chem. Phys., 9(13), 4239-4249.
- Chen, T.; Simpson, I. J.; Blake, D. R.; Rowland, F. S. (2001). Impact of the leakage of liquefied petroleum gas (LPG) on Santiago Air Quality. Geophys. Res. Lett., 28(11), 2193–2196.
- 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, Atmos. Chem. Phys., 5, 2267–2288.
- Doherty, R. M.; Stevenson, D. S.; Johnson, C. E.; Collins, W. J.; Sanderson, W. J. (2006), Tropospheric ozone and El Niño–Southern Oscillation: Influence of atmospheric dynamics, biomass burning emissions, and future climate change, J. Geophys. Res., 111, D19304.
- Dockery, D. W.; Schwartz, J.; Spengler, J. D.: Air-Pollution And Daily Mortality AssociationsWith Particulates And Acid Aerosols, Environ. Res., 59(2), 362–373, 1992.
- Dominguez-Taylor, P.; Ruiz-Suarez, L. G.; Rosas-Perez, I.; Hernández-Solis, J. M.; Steinbrecher, R. (2007). Monoterpene and isoprene emissions from typical tree species in forests around Mexico City. Atmos. Environ., 41(13), 2780–2790.
- Duncan, B. N.; Yoshida, Y.; Damon, M. R.; Douglass, A. R.; Witte, A. R. (2009). Temperature dependence of factors controlling isoprene emissions, Geophys. Res. Lett., 36, L05813,
- Duncan, B. N.; Yoshida, Y.; Olson, J. R.; Sillman, S.; Martin, R. V.; Lamsal, L.; Hu, Y.; Pickering, K. E.; Retscher, C.; Allen, D. J. (2010).

  Application of OMI observations to a space-based indicator of NOx and VOC controls on surface ozone formation. Atmos. Environ., 44: 2213-2223.
- Dusanter, S.; Vimal, D.; Stevens, P. S.; Volkamer, R.; Molina, L. T. (2009). Measurements of OH and HO2 concentrations during the MCMA-2006 field campaign Part 1: Deployment of the Indiana University laser-induced fluorescence instrument. Atmos. Chem. Phys., 9(5), 1665–1685.
- Filella, I., & Peñuelas, J. (2006). Daily, weekly, and seasonal time courses of VOC concentrations in a semi-urban area near Barcelona. Atmos. Environ., 40(40), 7752–7769.
- Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. N. (2000). Chemistry of the upper and lower atmosphere, Academic Press, USA.
- Fuentes, J. D.; Lerdau, M.; Atkinson, R.; Baldocchi, D.; Bottenheim, J. W.; Ciccioli, P.; Lamb, B.; Geron, C.; Gu, L.; Guenther, A.; Sharkey, T.D.; Stockwell, W. (2000). Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review. Bulletin of the American Meterological Society 81, 1537–1575.
- Fujita, E. M.; Campbell, D. E.; Zielinska, B.; Sagebiel, J. C.; Bowen, J. L.; Goliff, W.; Stockwell, W. R.; Lawson, D. R. (2003). Diurnal and Weekday Variations in the Source Contributions of Ozone Precursors in California 's South Coast Air Basin J. Air & Waste Manage.

- Gasca, J.; Ortiz, E.; Castillo, H.; Jaimes, J.L.; Gonzalez, U. (2004). The impact of liquefied petroleum gas usage on air quality in Mexico City. Atmos. Environ., 38(21), 3517–3527.
- Guo, H.; Lee, S. C.; Louie, P. K. K.; Ho, K. F. (2004). Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong. Chemosphere, 57(10), 1363–72.
- Jaimes Palomera, M. C.; Retama Hernández, A. (2013). Diseño de la monitorización de precursores oxidantes fotoquímicos en ciudad de México y su área metropolitana. Seguridad y Medio Ambiente, 129:54-67.
- Guenther, A. B.; Zimmerman, P. R.; Harley, P. C.; Monson, R.; Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. Journal of Geophysical Research 98(D7), 12609–12617.
- Jacobson, Mark Z. (2012). Air pollution and global warming history, science, and solutions. Cambridge University Press. 2nd. Edition.
- Jaimes-Palomera, M.; Retama, A.; Elias-Castro, G.; Neria-Hernández, A.; Rivera-Hernández, O.; Velasco, E. (2016). Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Mexico City: Results of the 2012 ozone-season campaign. Atmos. Environ., 132, 258-275.
- Lerdau, M.; Guenther, A.; Monson, R. (2013). Plant Production Emission of Volatile Organic Compounds Plant-produced hydrocarbons influence not only the plant itself but the atmosphere as well. BioScience, 47(6), 373–383.
- Liao, H.; Chen W.; Seinfeld J. H. (2006). Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols, J. Geophys. Res., 111, D12304.
- Liousse, C.; Cachier, H.; Jennings, S. G. (1993). Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments variation of the specific attenuation cross-section, sigma (sigma). Atmos. Environ., 27(8), 1203–1211.
- Morganti, K. J.; Foong, T. M.; Brear, M. J.; Da Silva, G.; Yang, Y.; Dryer, F. L. (2013). The Research and Motor octane numbers of Liquefied Petroleum Gas (LPG). Fuel, (February).
- Monson, R. K.; Jones, R. T.; Rosenstiel, T. N.; Schnitzler, J.P. (2013). Why only some plants emit isoprene. Plant, Cell & Environment, 36(3), 503–16.
- Mugica, V.; Vega, E.; Arriaga, J. L.; Ruiz, M. E. (1998). Determination of Motor Vehicle Profiles for Non-Methane Organic Compounds in the Mexico City Metropolitan Area, Journal of the Air & Waste Management Association, 48 (11), 1060-1068.
- Mugica, V.; Ruiz, M. E.; Watson, J.; Chow, J. (2003). Volatile aromatic compounds in Mexico City atmosphere: levels and source apportionment. Atmosfera, 16, 15–27.
- Mugica, V.; Watson, J.; Vega, E.; Reyes, E.; Ruiz, M. E.; Chow, J. (2002). Receptor model source apportionment of non-methane hydrocarbons in Mexico City. The Scientific World Journal, 2, 844-860.
- NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015, publicado en línea en enero de 2016. Consultado en febrero, 2016, http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513
- Ortiz, E.; Alemón, E.; Romero, D.; Arriaga, J. L.; Olaya, P.; Guzmán, F.; Ríos, C. (2002). Personal exposure to benzene, toluene and xylene in different microenvironments at the Mexico City metropolitan zone The Science of the Total Environment 287, 241-248.
- Organización Mundial de la Salud (2003). Indice UV solar mundial : guía práctica. Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. Documento WHO/SDE/OEH/02.2.
- Parrish, D. D.; Kuster, W. C.; Shao, M.; Yokouchi, Y.; Kondo, Y.; Goldan, P. D.; de Gouw, J. A.; Koike, M.; Shirai, T. (2009). Comparison of air pollutant emissions among mega-cities. Atmos. Environ. 43, 6435-6441.
- Padhy, P. K., & Varshney, C. K. (2005). Isoprene emission from tropical tree species. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 135(1), 101–9.
- Park, S. S.; Hansen, A. D. A.; Cho, Y. (2010). Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. Atmos. Environ., 44 (11), 1449–1455
- Petzold, A.; Kopp, C.; Niessner, R. (1997). The dependence of the specific attenuation cross-section on black carbon mass fraction and particle size, Atmos. Environ., 31(5), 661–672.
- 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, Atmos. Chem. Phys., 13, 8365-8379.
- Pope, C. A. (2000). Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk? Environmental Health Perspectives, 108(August), 713–723.
- Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geosci, 1(4), 221–227.
- Reimann, S.; Calanca, P.; Hofer, P. (2000). The anthropogenic contribution to isoprene concentrations in a rural atmosphere. Atmos. Environ., 34 (1), 109–115.
- Roberts, J. M.; Fehsenfeld, F. C.; Liu, S.C.; Bollinger, M. J.; Hahn, C.; Albritton, D. L.; Sievers, R. E. (1984). Measurements of aromatic hydrocarbon ratios and NOx concentrations in the rural troposphere: Observation of air mass photochemical aging and NOx removal. Atmos. Environ., 18, 2421-2432.
- Sharkey, T. D.; Wiberley, A. E.; Donohue, A. R. (2008). Isoprene emission from plants: why and how. Annals of Botany, 101(1), 5–18.
- Shirley, T. R.; Brune, W. H.; Ren, X.; Mao, J.; Lesher, R.; Cardenas, B.; Volkamer, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Lamb, B., Velasco, E.; Jobson, T.; Alexander, M. (2006). Atmospheric oxidation in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) during April 2003, Atmos. Chem. Phys., 6, 2753–2765.
- Secretaría de Energía (2012). Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2012-2026. México.

- Secretaría del Medio Ambiente (2014a). Informe Anual de Calidad del Aire en la Ciudad de México 2013. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D. F..
- Secretaría del Medio Ambiente (2014b). Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D. F.
- Seibert, P.; Beyrich, F.; Gryning, S.-E; Joffre, S.; Rasmussen, A.; Tercier P. (2000). Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height, Atmos. Environ., 34(7), 1001–1027.
- Sosa, E. R.; Bravo, A. H.; Mugica, A. V.; Sanchez, A. P.; Bueno, L. E.; Krupa, S. (2009). Levels and source apportionment of volatile organic compounds in southwestern area of Mexico City. Environ. Poll, 157(3), 1038–1044.
- Tingey, D.T.; Manning, M.; Grothaus, L.C.; Burns, W.F. (1979). The influence of light and temperature on isoprene emission rates from live oak. Plant Physiology 47, 112–118.
- Tseng, K.; Wang, J.; Cheng, M.; Tsuang, B. (2009a). Assessing the Relationship between Air Mass Age and Summer Ozone Episodes Based on Photochemical Indices, 9(2), 149–171.
- Tseng, K.-H.; Wang, J.-L.; Kuo, P.-H.; Tsuang, B.-J. (2009b). Using a Photochemical Index to Discuss the Ozone Formation and Estimate Hydroxyl Concentration at Downwind Area. Aerosol and Air Quality Research, 441–452.
- Vega, E.; Mugica, V.; Carmona, R.; Valencia E. (2000). Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor model. Atmos. Environ. 34, 4121-4129.
- Von Schneidemesser, E.; Monks, P. S.; Plass-Duelmer, C. (2010). Global comparison of VOC and CO observations in urban areas. Atmos. Environ., 44(39), 5053–5064.
- Velasco, E.; Lamb, B.; Westberg, H.; Allwine, E.; Sosa, G.; Arriaga-Colina, J. L.; Jobson, B. T.; Alexander, M. L.; Prazeller, P.; Knighton, W. B.; Rogers, T. M.; Grutter, M.; Herndon, S. C.; Kolb, C. E.; Zavala, M.; de Foy, B.; Volkamer, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J. (2007) Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns, Atmos. Chem. Phys., 7 (2), 329-353.
- Velasco, E.; Márquez, C.; Bueno, E.; Bernabé, R. M.; Sánchez, A.; Fentanes, O.; Wöhrnschimmel, H.; Cárdenas, B.; Kamilla, A.; Wakamatsu, S.; Molina, L. T. (2008). Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City, Atmos. Chem. Phys., 8 (12), 3061-3079.
- Velasco, E.; Perrusquia, R.; Jiménez, E.; Hernández, F.; Camacho, P.; Rodríguez, S.; Retama, A.; Molina, L. T. (2014). Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City. Atmos. Environ., 97, 226-238.
- Velasco, E.; Pressley, S.; Grivicke, R.; Allwine, E.; Coons, T.; Foster, W.; Jobson, B. T.; Westberg, H.; Ramos, R.; Hernández, F.; Molina, L. T.; Lamb, B. (2009). Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City. Atmos. Chem. Phys., 9(19), 7325-7342.
- Virkkula, Aki; Mäkelä, T.; Hillamo, R.; Yli-Tuomi, T.; Hirsikko, A.; Hämeri, K.; Koponen, I. K. (2007) A Simple Procedure for Correcting Loading Effects of Aethalometer Data. J. Air & Waste Manage. Assoc., 57(10), 1214-1222.
- Volkamer, R.; Sheehy, P.; Molina, L. T.; Molina, M. J. (2010). Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere Part 1: A radical source perspective. Atmos. Chem. Phys., 10(14), 6969–6991.
- Wagner, P., & Kuttler, W. (2014). Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere a case study in Essen, Germany. The Science of the Total Environment, 475, 104–15.
- Wöhrnschimmel, H.; Magaña, M.; Stahel, W. A.; Blanco, S.; Acuña, S.; Pérez, J. M.; González, S.; Gutiérrez, V.; Wakamatsu, S.; Cárdenas, B. (2010). Measurements and receptor modeling of volatile organic compounds in Southeastern Mexico City, 2000–2007. Atmos. Chem. Phys., 10(18), 9027-9037.
- Wöhrnschimmel, H.; Márquez, C.; Mugica, V.; Stahel, W. A.; Staehelin, J.; Cárdenas, B.; Blanco, S. (2006). Vertical profiles and receptor modeling of volatile organic compounds over Southeastern Mexico City. Atmos. Environ., 40(27), 5125–5136.
- World Health Organization (2012). Health effects of black carbon. WHO European Centre for Environment and Health, WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark
- Yang, K.; Ting, C.; Wang, J.; Wingenter, O.; Chan, C. (2005). Diurnal and seasonal cycles of ozone precursors observed from continuous measurement at an urban site in Taiwan. Atmos. Environ., 39(18), 3221–3230.
- Yokouchi Y. (1994) Seasonal and diurnal variation of isoprene and its reaction products in a semi-rural area. Atmos. Environ., 28(16), 2651-2658
- Zeng, G., & Pyle J. A. (2003). Changes in tropospheric ozone between 2000 and 2100 modeled in a chemistry-climate model, Geophys. Res. Lett., 30, 1392.

## **Anexos**

### **ANEXO 1**

### Configuración del Sistema de Monitoreo Atmosférico

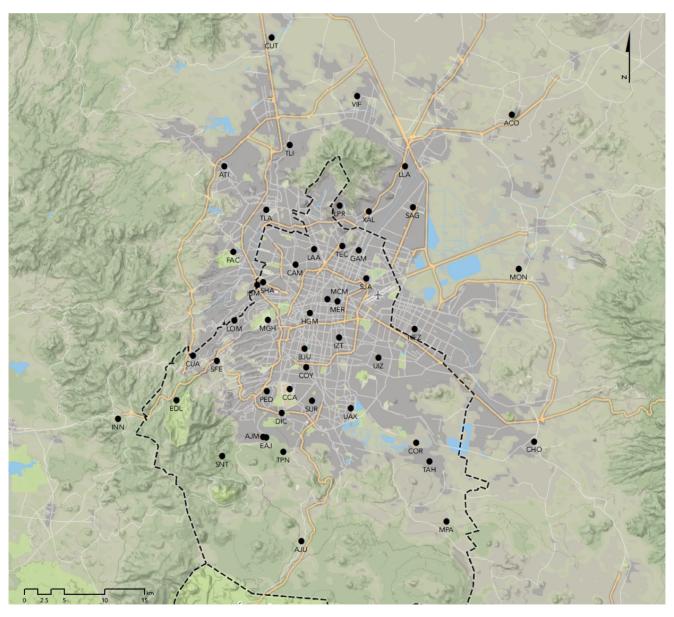
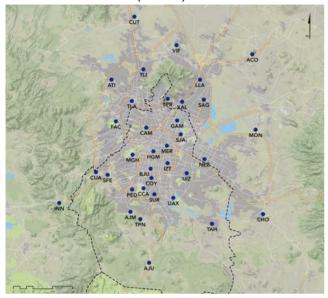


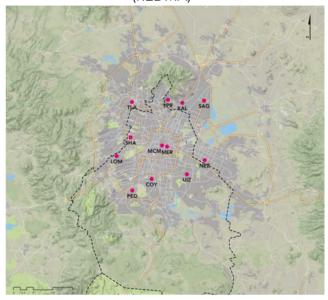
Figura A1.1. Distribución de los sitios de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

### Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)



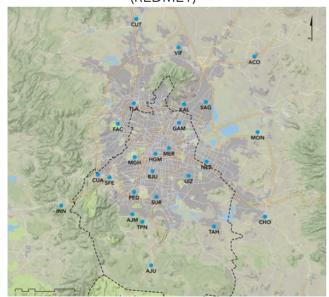
**Figura A1.2.** Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2015.

### Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)



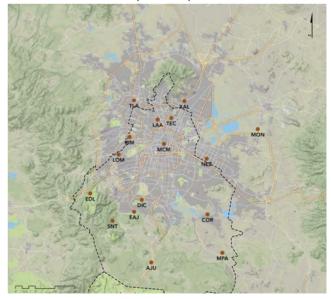
**Figura A1.3.** Estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2015.

#### Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)



**Figura A1.4.** Estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar en operación durante 2015.

### Red de Depósito Atmosférico (REDDA)



**Figura A1.5.** Estaciones de la Red de Depósito Atmosférico en operación durante 2015.

**Tabla A1.1.** Estaciones que integran la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

					Par	áme	tros	;			
Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	ő	Š	0	$SO_2$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	PM10.2 F
	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986					PM <sub>10</sub>		
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago – 2003							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
		Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	Ago – 2014							1
	Couracin	Coyoacán	COY	Ago – 2003							
	Coyoacán	Santa Úrsula	SUR	May – 1986					SOS		
		UAM Xochimilco	UAX	Feb – 2012							
	<b>.</b>	Cuajimalpa	CUA	Nov – 1993							
	Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	Feb – 2012						PM <sub>25</sub>	
Distrito Federal	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb - 2012							
		Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
	Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	SJA	Ago – 2003						PM <sub>25</sub>	
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul – 2007							
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1986							
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene – 2015							
		Ajusco	AJU	Ene – 2015							
	Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
		Tlalpan	TPN	Nov – 1993							
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov – 1993						PM <sub>25</sub>	
	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2007							
	Atizapán	Atizapán	ATI	Nov – 1993							
	Chalco	Chalco	СНО	Jul – 2007							
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Nov – 1993							
		Los Laureles	LLA	Feb – 1986							
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb – 1986						PM <sub>2.5</sub>	
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986							
Estado de	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
México	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Ago – 2015							
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
	Техсосо	Montecillo	MON	Nov – 1993							
	<b>-</b>	La Presa	LPR	Ene – 1986							
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986							
	Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov – 1993						PM <sub>2</sub> S	

**Tabla A1.2.** Estaciones que integran la Red Manual de Monitoreo Atmosférico.

					Pará	rámetros  BM10  BM25  BP-PST			
Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	PST	$^{10}$	$PM_{2.5}$	Pb-PST	Pb-PM <sub>10</sub>
	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1989					
	Coyoacán	Coyoacán	COY	Ago – 2003					
Coyoacán         Coyoacán         COY         Ago – 2003           Distrito Federal         Latapalapa         UIZ         Ene – 1989           Miguel Hidalgo         Lomas         LOM         Ene – 1989           Secretaría de Hacienda         SHA         Ene – 1989									
Distrito Federal	Missoal Histolana	Lomas	LOM	Ene – 1989					
	Wilguel Fildalgo	Secretaría de Hacienda	SHA	Ene – 1989					
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1989					
	_	San Agustín	SAG	Ago – 2003					
	Ecatepec	Xalostoc	XAL	Ene – 1989					
Venustial  Ecatepeo  Estado de México  Nezahua	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene – 1989					
cxico	T. I	La Presa	LPR	Ene – 1989					
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1989					

**Tabla A1.3.** Estaciones que integran la Red de Meteorología y Radiación Solar.

					Par	ámet	ros				
Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	WSP	WDR	TMP	H.	RUV-A	RUV-B	PA
	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
	•	Santa Úrsula	SUR	Ago – 2008							
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Abr – 2015				RUY-A			
	Constitution of the consti	Cuajimalpa	CUA	Jun – 2000						RUV-B	
	Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	Feb – 2012							
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb – 2012							
Distrito Federal	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr – 2014							
rederal	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb – 2015							
		Ajusco	AJU	May – 2015							
	Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
		Tlalpan	TPN	Jun – 2000						RUV-B	
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun – 2000							
	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2011							
	Chalco	Chalco	СНО	Jul – 2011							
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun – 2000							
	Eastenee	San Agustín	SAG	Feb – 1986							
	Ecatepec	Xalostoc	XAL	Ene – 1986						RUV-B	
Estado de México	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep – 2015						RUV-B	
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
	Техсосо	Montecillo	MON	Jun – 2000							
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986							

**Tabla A1.4.** Estaciones que integran la Red de Depósito Atmosférico.

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

#### Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico

**Tabla A2.1.** Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Distrito Federal, durante 2015.

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro	D 1 1	DED	RAMA	SO2	10/03/2015	24:00	07/04/2015	24:00	Falla del equipo
Obregón	Pedregal	PED	REDMET	UVB	01/01/2015	20:00	31/12/2015	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio
				NOx, NO <sub>2</sub> , NO,	01/01/2015	1:00	21/01/2015	1:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO,	10/09/2015	11:00	02/10/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	10/11/2015	24:00	24/12/2015	24:00	Falla en el equipo
	Coyoacán	COY	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	01/12/2014	1:00	20/03/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				SO <sub>2</sub>	26/02/2015	24:00	-	-	Fin de operación
			RAMA	CO, NOx, NO <sub>2</sub> , NO	11/03/2015	24:00	=	-	Fin de operación
Coyoacán	Santa Úrsula	SUR	10 (17)	O <sub>3</sub>	30/04/2015	24:00	-	-	Fin de operación
				PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	24/06/2015	24:00	-	-	Fin de operación
			REDMET	WSP, WDR	24/06/2015	24:00	-	-	Fin de operación
	UAM Xochimilco	UAX	REDMET	RH,TMP,WSP,WDR	01/04/2015	1:00	-	-	Inicio de operación
			RAMA	PM <sub>10</sub>	27/08/2014	1:00	11/02/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
	Cuajimalpa	CUA		SO <sub>2</sub>	23/07/2015	22:00	31/12/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
			REDMET	TMP	10/03/2015	11:00	08/04/2015	24:00	Falla en el sensor
C				СО	01/01/2015	1:00	25/03/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Cuajimalpa				SO <sub>2</sub>	25/01/2015	1:00	25/03/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
	Santa Fe	SFE	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	01/03/2015	1:00	25/03/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
				PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	30/08/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				SO <sub>2</sub> , CO,O <sub>3</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO	31/08/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
			RAMA	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	11/09/2015	1:00	28/10/2015	24:00	Falla en el equipo
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	REDMET	RH,TMP,WSP,WDR	21/08/2014	15:00	18/03/2015	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio
			KLDIVILI	RH,TMP,WSP,WDR	14/08/2015	13:00	04/09/2015	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio
				NOx, NO <sub>2</sub> , NO	25/02/2015	1:00	08/04/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	SJA	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	01/08/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
	ű.			SO <sub>2</sub> , CO,O <sub>3</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/09/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
Iztacalco	Iztacalco	IZT	REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	08/07/2015	1:00	31/07/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
ztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	RH,TMP,WSP,WDR	01/04/2015	1:00	-	-	Inicio de operación
	Ajusco Medio	AJM	REDMET	WSP,WDR	10/02/2015	1:00	28/03/2015	1:00	Falla en el sensor
Tlalpan			RAMA	SO <sub>2</sub> , CO, NOx, NO <sub>2</sub> , NO	10/03/2015	24:00	-	-	Fin de operación
	Tlalpan	TPN		O <sub>3</sub> ,	06/07/2015	24:00	-	-	Fin de operación
			REDMET	WSP,WDR	22/02/2015	24:00	-	-	Fin de operación
			RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	21/01/2015	1:00	19/03/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
Venustiano Carranza	Merced	MER	REDMET	RH,WSP,WDR	01/10/2015	1:00	23/10/2015	24:00	Falla en el sensor
				TMP	22/09/2015	1:00	17/12/2015	23:00	Falla en el sensor
				PM <sub>10</sub>	30/08/2015	24:00	05/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	SO <sub>2</sub> , CO,O <sub>3</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO	31/08/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
			REDMET	RH	02/09/2015	6:00	21/09/2015	24:00	Falla en el sensor

**Tabla A2.2.** Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México, durante 2015.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
				NOx, NO <sub>2</sub> , NO	11/02/2015	1:00	02/03/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
				SO <sub>2</sub>	21/08/2015	16:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	CO,O <sub>3</sub>	01/09/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				PM <sub>10</sub>	01/09/2015	1:00	01/12/2015	7:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				PM <sub>10</sub>	05/01/2015	1:00	30/01/2015	23:00	Obras en los alrededores de la estación
Atizapán	Atizapán	ATI	RAMA	SO <sub>2</sub> , CO,O <sub>3</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO	01/09/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				PM <sub>10</sub>	01/09/2015	1:00	01/12/2015	7:00	Fuera de línea temporal por falta
				CO	17/01/2014	1:00	19/03/2015	24:00	de suministros Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
Chalco	Chalco	СНО	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO	01/01/2014	1:00	31/12/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				O <sub>3</sub>	07/02/2015	18:00	19/03/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				PM <sub>10</sub>	23/08/2015	24:00	01/12/2015	7:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
Coacalco	Villa de las Flores	VIF	RAMA	SO <sub>2</sub> , CO,O <sub>3</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO	24/08/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
			REDMET	RH	15/06/2015	1:00	13/07/2015	24:00	Falla en el sensor
				CO	14/02/2013	11:00	19/03/2015	7:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				SO <sub>2</sub>	10/03/2015	22:00	14/04/2015	13:00	Falla en el equipo
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	СО	01/06/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
Ecatepec				NOx, NO <sub>2</sub> , NO	05/07/2015	1:00	31/12/2015	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				SO <sub>2</sub>	09/09/2015	24:00	28/09/2015	24:00	Falla de energía eléctrica
				O <sub>3</sub>	09/09/2015	24:00	29/08/2015	10:00	Falla de energía eléctrica
Naaalaaa	Xalostoc FES-Acatlán	XAL FAC	RAMA REDMET	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco WSP, WDR	23/07/2014 01/01/2015	22:00 1:00	08/04/2015 26/01/2015	1:00	Falla en el equipo Falla en el sensor
Naucalpan				•			10/04/2015		Se retira el sensor para
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	REDMET	RH,TMP,WSP,WDR PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	18/03/2015 12/12/2015	11:00	21/12/2015	24:00 7:00	mantenimiento en el laboratorio Falla en el equipo
Ocoyoacac	Investigaciones	INN	RAMA	CO,O <sub>3</sub>	21/12/2015	8:00	31/12/2015	24:00	Falla de comunicación con la
Ocoyoacac	Nucleares	IININ		CO,O3	21/12/2013		31/12/2015	24:00	estación Falla en el sensor
<b>-</b> 1.			REDMET	RH TMP	19/11/2015	1.()()			
Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	REDMET RAMA	RH,TMP NOx, NO <sub>2</sub> , NO	19/11/2015 22/10/2015	1:00	07/12/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en
Tepotzotian	Cuautitlán	CUT		•					Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en
I epotzotian	Cuautitlán	CUT		NOx, NO <sub>2</sub> , NO	22/10/2015 01/01/2015	1:00	07/12/2015	24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio
Tepotzotian	Cuautitlán	CUT		NOx, NO <sub>2</sub> , NO	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015	1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en
Texcoco	Cuautitlán Montecillo	CUT	RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub>	22/10/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00	07/12/2015	24:00 24:00 13:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta
<u> </u>			RAMA RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub>	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015	24:00 24:00 13:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en
<u> </u>			RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 10:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros
<u> </u>			RAMA RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 10:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio
<u> </u>			RAMA RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 10:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio
Техсосо			RAMA RAMA	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB SO <sub>2</sub> ,CO	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio
<u> </u>	Montecillo	MON	RAMA RAMA REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB SO <sub>2</sub> ,CO NOx, NO <sub>2</sub> , NO	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015 01/01/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015 31/12/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación
Техсосо	Montecillo	MON	RAMA RAMA REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB SO <sub>2</sub> ,CO NOx, NO <sub>2</sub> , NO O <sub>3</sub>	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015 01/01/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015 31/12/2015 09/03/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por obras
Техсосо	Montecillo La Presa	MON	RAMA  REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB SO <sub>2</sub> ,CO NOx, NO <sub>2</sub> , NO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO PM <sub>10</sub> , PM <sub>25</sub> , PMco	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015 01/01/2015 01/01/2015 30/10/2015 10/11/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015 31/12/2015 09/03/2015 31/12/2015 31/12/2015 15/02/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Falla en el equipo
Техсосо	Montecillo	MON	RAMA RAMA REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO  CO  O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR  UVA,UVB  SO <sub>2</sub> ,CO  NOx, NO <sub>2</sub> , NO  O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO  PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco  PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PMco	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 30/10/2015 10/11/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015 31/12/2015 09/03/2015 31/12/2015 31/12/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Falla en el equipo
Техсосо	Montecillo La Presa	MON	RAMA  REDMET	NOx, NO <sub>2</sub> , NO CO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> RH,TMP,WSP,WDR UVA,UVB SO <sub>2</sub> ,CO NOx, NO <sub>2</sub> , NO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO PM <sub>10</sub> , PM <sub>25</sub> , PMco	22/10/2015 01/01/2015 01/01/2015 01/01/2015 15/07/2015 01/01/2015 09/03/2015 01/01/2015 01/01/2015 30/10/2015 10/11/2015 01/01/2015	1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00 1:00	07/12/2015 05/03/2015 09/04/2015 20/03/2015 31/12/2015 17/03/2015 31/12/2015 20/03/2015 31/12/2015 09/03/2015 31/12/2015 31/12/2015 15/02/2015	24:00 24:00 13:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00 24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Falla en el equipo Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Retiro para mantenimiento en laboratorio Fuera de línea temporal por falta de suministros Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Fuera de línea temporal por obras cercanas a la estación Falla en el equipo

#### Nuevas estaciones de monitoreo

Tabla A3.1. Información básica de las nuevas estaciones de monitoreo.

Entidad	Estación	Clave	Subred	Parámetros	Inicio de operación
Distrito Federal	Ajusco Medio	AJM	RAMA	SO <sub>2</sub> , NO <sub>X</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/01/2015 01:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/01/2015 01:00
	Ajusco	AJU	RAMA	O <sub>3</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/01/2015 01:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/04/2015 01:00
	Benito Juárez	BJU	RAMA	SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/08/2015 01:00
			REDMET	W, DV, TMP, HR	01/08/2015 01:00
	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	O <sub>3</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/12/2015 01:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/12/2015 01:00
	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	SO <sub>2</sub> , NO <sub>X</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	01/01/2015 01:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/01/2015 01:00
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	RAMA	SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	19/08/2015 01:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/09/2015 01:00



Figura A3.1. Ubicación de las nuevas estaciones de monitoreo

#### Ajusco Medio (AJM)

Domicilio: Encinos No. 42, Col. Ampliación Miguel Hidalgo, 4a Secc., Tlalpan, C.P. 14250, Ciudad de

México.

**Latitud:** 19.272100 **Longitud:** -99.207658 **Altitud:** 2619 msnm

 $\textbf{Parámetros:} \hspace{0.3cm} SO_{2}, \hspace{0.1cm} NO\chi, \hspace{0.1cm} NO_{2}, \hspace{0.1cm} NO, \hspace{0.1cm} CO, \hspace{0.1cm} O_{3}, \hspace{0.1cm} PM_{10}, \hspace{0.1cm} PM_{2.5} \hspace{1.5cm} \textbf{Meteorología:} \hspace{0.3cm} VV, \hspace{0.1cm} DV, \hspace{0.1cm} TMP, \hspace{0.1cm} HR$ 

Observaciones: Edificio del Hospital del Ajusco Medio "Dra. Obdulia Rodríguez Rodríguez",



Figura A3.2. Estación Ajusco Medio (AJM)

# Ajusco (AJU)

**Domicilio:** Km 36.5, Carretera Federal México-Cuernavaca, Tlalpan, C.P. 14500, Ciudad de México.

**Latitud:** 19.154674 **Longitud:** -99.162459 **Altitud:** 2953 msnm

Parámetros: O<sub>3</sub>, Meteorología: VV, DV, TMP, HR

PM<sub>2.5</sub>

Observaciones: Instalaciones de la Comisión de Recursos Naturales (CORENA) centro regional #2.



Figura A3.3. Estación Ajusco (AJU)

#### Benito Juárez (BJU)

**Domicilio:** Municipio libre y Uxmal No. 803, Col. Santa Cruz Atoyac, Benito Juarez, C.P. 03310.

**Latitud:** 19.371612 **Longitud:** -99.158969 **Altitud:** 2250 msnm

 $\begin{array}{lll} \textbf{Parámetros:} & & \mathsf{SO}_{2},\,\mathsf{CO},\,\mathsf{O}_{3},\,\mathsf{PM}_{10},\,\mathsf{PM}_{2.5} & & \textbf{Meteorología:} & \mathsf{VV},\,\mathsf{DV},\,\mathsf{TMP},\,\mathsf{HR} \\ \end{array}$ 

Observaciones: Edificio de la Delegación Benito Juárez.



Figura A3.4. Estación Benito Juárez (BJU)

#### Gustavo A. Madero (GAM)

Domicilio: Av. Ing. Eduardo Molina No. 1577, Col. Salvador Diaz Mirón, C.P. 07400, Ciudad de

México.

**Latitud:** 19.482700 **Longitud:** -99.094517 **Altitud:** 2227 msnm

Parámetros: O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> Meteorología: VV, DV, TMP, HR

Observaciones: Edificio D de la Escuela Nacional Preparatoria Plantel 3. "Justo Sierra", Universidad

Nacional Autónoma de México.



Figura A3.5. Estación Gustavo A. Madero (GAM)

# Miguel Hidalgo (MGH)

**Domicilio:** Calle Sur 128 No. 53, Col. América, Miguel Hidalgo, C.P. 11820, Ciudad de México.

**Latitud:** 19.404050 **Longitud:** -99.202603 **Altitud:** 2366 msnm

Observaciones: Instalaciones del Faro del Saber "Carmen Serdán".



Figura A3.6. Estación Miguel Hidalgo (MGH)

# **Investigaciones Nucleares (ININ)**

**Domicilio:** Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, C.P. 52750, Estado de México.

Latitud: 19.291968 Longitud: -99.38052 Altitud: 3082 msnm

Observaciones: Instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.



Figura A3.7. Estación Investigaciones Nucleares (INN)

#### Estadísticas básicas

**Tabla A4.1.** Estadísticas básicas para dióxido de azufre, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ES	TADÍ	STICA	S BA	ÁSIC	AS			CUMPL	MIENTO	DE LA N	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
	Ajusco Medio	AJM	92	4	65	3	0	6	2	0	1	1	3	8	24	42	3	Si
	Benito Juárez	BJU	27	1	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Camarones	CAM	91	4	149	6	0	10	4	1	2	3	6	14	46	69	6	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	93	4	88	4	0	6	3	1	1	2	4	8	27	54	4	Si
	Cuajimalpa	CUA	51	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Hospital General de México	HGM	95	4	108	6	0	9	3	1	2	3	5	13	42	59	6	Si
<u>ra</u>	Iztacalco	IZT	92	4	94	5	0	7	3	1	2	3	5	10	33	55	5	Si
ede-	Merced	MER	92	4	166	5	0	8	3	1	2	3	5	11	41	53	5	Si
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	93	4	105	4	0	7	3	0	1	2	4	10	32	66	4	Si
Distr	Pedregal	PED	87	4	99	4	0	6	3	1	1	2	4	8	25	49	4	Si
_	San Juan de Aragón	SJA	65	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	48	1	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	15	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	60	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tlalpan	TPN	17	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	4	94	4	0	6	2	1	2	2	4	8	30	46	4	Si
	UAM Xochimilco	UAX	97	4	93	3	0	5	2	0	1	1	3	6	24	36	3	Si
	Acolman	ACO	60	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Atizapán	ATI	64	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	97	4	54	2	0	3	1	1	1	1	2	4	11	22	2	Si
	Cuautitlán	CUT	95	4	299	5	0	13	3	1	1	2	4	12	63	146	5	Si
	FES Acatlán	FAC	94	4	147	6	0	10	4	1	2	3	6	13	39	88	6	Si
léxico	Investigaciones Nucleares	INN	19	0	_	-	-	_	_	-	-	-	_	_	_	_	_	_
e N	La Presa	LPR	59	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Estado de M	Los Laureles	LLA	83	4	175	5	0	11	4	1	1	2	5	11	35	81	5	Si
Esta	Nezahualcóyotl	NEZ	30	1	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	San Agustín	SAG	96	4	105	3	0	6	2	1	1	2	3	7	26	45	3	Si
	Tlalnepantla	TLA	98	4	166	5	0	9	3	1	2	3	5	10	32	71	5	Si
	Tultitlán	TLI	95	4	172	8	0	12	6	2	2	4	8	18	53	85	8	Si
	Villa de las Flores	VIF	64	2	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	56	1	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_

**Tabla A4.2.** Estadísticas básicas para dióxido de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTAD	ÍSTIC	AS BÁ	SICAS	5			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
	Ajusco Medio	AJM	92	93	19	1	11	14	7	11	18	25	33	0	Si
	Camarones	CAM	81	120	34	6	14	17	18	24	32	41	51	0	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	88	109	26	3	13	16	13	17	24	33	43	0	Si
	Coyoacán	COY	73	_	_	_		_		_	_	_	_	_	_
	Cuajimalpa	CUA	97	130	24	0	12	16	10	14	21	30	39	0	Si
	Hospital General de México	HGM	92	128	33	5	14	18	17	23	31	41	52	0	Si
eral	Iztacalco	IZT	82	119	34	7	14	17	18	24	32	41	51	0	Si
Fed	Merced	MER	78	116	35	6	14	18	19	25	33	43	53	0	Si
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	91	125	30	4	14	17	15	20	28	37	48	0	Si
Dist	Pedregal	PED	92	95	24	2	12	15	10	15	22	30	40	0	Si
	San Juan de Aragón	SJA	45	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	40	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	19	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tlalpan	TPN	17	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	111	29	4	14	18	12	19	28	37	47	0	Si
	UAM Xochimilco	UAX	94	95	23	1	12	15	9	15	22	30	38	0	Si
	Acolman	ACO	58	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Atizapán	ATI	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuautitlán	CUT	84	105	20	2	11	16	7	11	18	27	35	0	Si
_	FES Acatlán	FAC	87	136	27	4	15	16	12	17	23	33	46	0	Si
México	La Presa	LPR	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
e <u>K</u>	Los Laureles	LLA	47	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
~	Montecillo	MON	83	53	15	1	8	10	6	10	14	20	26	0	Si
Estado c	Nezahualcóyotl	NEZ	96	101	27	5	13	18	12	17	25	35	44	0	Si
Ш	San Agustín	SAG	97	87	24	3	11	15	11	15	22	30	38	0	Si
	Tlalnepantla	TLA	92	133	33	5	14	17	18	23	31	40	51	0	Si
	Tultitlán	TLI	65	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Villa de las Flores	VIF	55	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	90	111	32	5	14	18	16	22	31	40	50	0	Si

**Tabla A4.3.** Estadísticas básicas para monóxido de carbono, las unidades de concentración son ppm, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTA	DÍSTIC	CAS B	ÁSICA	\S			CUMPLIMIENT NOM	O DE LA
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 ppb (8 h)	Cumple
	Ajusco Medio	AJM	91	2	0.6	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.7	Si
	Benito Juárez	BJU	38	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Camarones Centro de Ciencias de la Atmósfera	CAM CCA	89 93	5.2 3.3	0.9	0.2	0.6 0.4	0.6 0.5	0.4	0.5 0.4	0.8	1.1 0.9	1.6 1.2	2.5 2	Si Si
	Cuajimalpa	CUA	94	3.4	0.6	0	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	2.2	Si
<u>e</u>	Hospital General de México	HGM	91	3.9	0.9	0	0.5	0.5	0.4	0.5	0.7	1	1.4	3.1	Si
ader	Iztacalco	IZT	95	5.1	1.1	0.2	0.6	0.6	0.5	0.7	0.9	1.3	1.8	3.8	Si
Distrito Federal	Merced	MER	86	4.7	1.1	0.2	0.6	0.6	0.5	0.7	0.9	1.3	1.8	3.4	Si
strit	Miguel Hidalgo	MGH	90	4.1	0.8	0.1	0.4	0.5	0.4	0.5	0.7	1	1.4	2.3	Si
Ξ	Pedregal	PED	95	2.9	0.5	0	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.7	1	1.8	Si
	San Juan de Aragón	SJA	61	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	41	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	19	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	62	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Xochimilco	UAX	96	4.2	8.0	0.1	0.5	0.5	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2.5	Si
	Acolman Atizapán	ACO ATI	93 62	2.6	0.6	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.8	1.1	2.6	Si
	Chalco	CHO	65			_	_	_	_	_	_	_	_		_
	FES Acatlán	FAC	76	4.1	0.7	0.1	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.2	2.1	Si
•	Investigaciones Nucleares	INN	94	4.9	0.8	0	0.6	0.6	0.3	0.4	0.6	1	1.6	2.5	Si
×ic	La Presa	LPR	31	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Ž	Los Laureles	LLA	62	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
ado de México	Montecillo	MON	20	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Estad	Nezahualcóyotl	NEZ	68	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
ш	San Agustín	SAG	96	5.4	0.7	0	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.4	3.1	Si
	Tlalnepantla	TLA	98	4.8	0.8	0.1	0.5	0.5	0.4	0.5	0.7	1	1.4	2.9	Si
	Tultitlán	TLI	95	4	0.9	0.1	0.5	0.5	0.4	0.6	0.8	1.1	1.6	2.6	Si
	Villa de las Flores	VIF	65	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	56	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_

**Tabla A4.4.** Estadísticas básicas para ozono, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTAD	DÍSTICA	AS BÁ	SICAS	;			CUMPL	IMIENTO NOM	DE LA
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
	Ajusco	AJU	87	136	33	0	25	34	6	14	28	48	69	171	102	No
	Ajusco Medio	AJM	92	155	39	0	27	32	11	20	33	52	79	418	110	No
	Benito Juárez	BJU	39	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Camarones	CAM	90	161	24	0	27	34	1	3	14	37	66	158	117	No
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	93	171	28	0	29	37	2	5	18	42	73	321	118	No
	Coyoacán	COY	88	161	28	1	28	37	2	5	18	42	71	249	113	No
	Cuajimalpa	CUA	93	176	34	1	27	32	6	15	28	47	74	329	130	No
Distrito Federal	Gustavo A. Madero Hospital General de México	GAM HGM	8 88	— 145	— 24	_ 0	— 25	— 32	_ 2	_ 4	— 15	— 36	— 62	— 106	— 108	– No
Fed	Iztacalco	IZT	91	160	27	1	28	36	3	5	16	41	71	237	108	No
rito	Merced	MER	95	148	23	0	26	32	1	3	13	35	65	154	110	No
Dist	Miguel Hidalgo	MGH	94	136	25	0	27	34	1	4	16	38	68	223	106	No
	Pedregal	PED	92	179	32	0	29	37	3	9	22	46	77	386	118	No
	San Juan de Aragón	SJA	65	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	64	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	33	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	63	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tlalpan	TPN	47	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	96	146	28	1	28	39	2	5	18	44	72	239	109	No
	UAM Xochimilco	UAX	97	157	30	0	30	41	1	6	21	47	76	346	117	No
	Acolman	ACO	62	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Atizapán	ATI	65	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	85	138	28	0	24	38	2	6	23	44	63	56	99	No
	Cuautitlán	CUT	95	108	22	0	19	31	2	4	18	35	52	5	81	No
	FES Acatlán	FAC	93	174	28	1	26	32	3	8	21	40	67	163	124	No
<u>.</u> 2	Investigaciones Nucleares	INN	31	_	-	_	_	_	-	-	-	_	_	_	_	_
Méx	La Presa	LPR	64	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
de	Los Laureles	LLA	90	141	25	0	25	35	1	4	16	39	63	72	110	No
Estado de México	Montecillo	MON	62	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Est	Nezahualcóyotl	NEZ	96	148	27	0	26	36	1	6	19	42	68	166	112	No
	San Agustín	SAG	97	144	26	1	25	33	2	6	18	39	64	90	108	No
	Tlalnepantla	TLA	95	151	24	0	25	32	1	4	14	36	63	124	108	No
	Tultitlán	TLI	65	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Villa de las Flores	VIF	56	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	93	94	21	1	19	27	2	4	15	31	49	0	77	No

**Tabla A4.5.** Estadísticas básicas para óxidos de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTA	ADÍSTIC	AS BÁS	ICAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
	Ajusco Medio	AJM	92	141	25	1	17	19	8	13	21	32	47
	Camarones	CAM	81	496	62	6	47	44	23	31	46	75	123
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	88	288	42	4	32	31	15	20	32	51	81
	Coyoacán	COY	73	_	_	_	_	_	_	_	_		_
	Cuajimalpa	CUA	97	368	36	0	28	26	13	18	28	44	68
	Hospital General de México	HGM	92	348	53	6	37	40	20	28	43	68	102
<u>6</u>	Iztacalco	IZT	82	348	57	8	41	42	21	29	44	71	108
eqei	Merced	MER	78	365	65	9	43	46	25	35	52	81	121
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	91	507	58	5	50	44	19	27	41	71	120
istrii	Pedregal	PED	92	222	35	4	25	27	11	17	27	44	67
Δ	San Juan de Aragón	SJA	45	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	40	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	19	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	63	_	_		_	_	_	_	_		_
	Tlalpan	TPN	17	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	322	47	4	36	40	14	22	37	62	94
	UAM Xochimilco	UAX	94	277	36	2	27	31	11	16	28	47	71
	Acolman	ACO	58	_	_		_	_	_	_	_		_
	Atizapán	ATI	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuautitlán	CUT	84	314	39	3	37	35	9	14	25	49	86
0	FES Acatlán	FAC	87	357	54	4	50	43	15	22	37	65	121
México	La Presa	LPR	0	_	_		_	_	_	_	_		_
e Š	Los Laureles	LLA	47	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
<del>ŏ</del> <u>o</u>	Montecillo	MON	83	338	30	2	32	22	8	12	18	34	66
Estado d	Nezahualcóyotl	NEZ	96	355	43	6	33	32	15	21	33	53	81
Ш	San Agustín	SAG	97	366	43	4	35	33	14	20	32	53	84
	Tlalnepantla	TLA	92	383	63	5	46	45	24	32	48	77	121
	Tultitlán	TLI	65	_	_	_	_	_	_	_	_		_
	Villa de las Flores	VIF	55	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	90	717	70	6	59	55	24	32	50	87	142

**Tabla A4.6.** Estadísticas básicas para óxido nítrico, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron más de 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTA	ADÍSTIC	AS BÁS	ICAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
	Ajusco Medio	AJM	92	96	6	0	9	6	0	1	2	7	16
	Camarones	CAM	81	422	28	0	40	27	3	5	11	32	78
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	88	262	15	0	26	14	1	2	4	16	43
	Coyoacán	COY	73	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuajimalpa	CUA	97	321	13	0	21	9	2	3	5	12	30
	Hospital General de México	HGM	92	305	20	0	29	23	1	3	8	26	57
<u>a</u>	Iztacalco	IZT	82	311	23	0	33	24	2	4	9	28	63
ede	Merced	MER	78	321	29	0	36	31	4	7	16	38	76
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	91	463	28	0	43	27	3	5	10	32	78
istri	Pedregal	PED	92	175	11	0	17	10	1	1	3	11	30
Δ	San Juan de Aragón	SJA	45	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	40	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	19	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tlalpan	TPN	17	_	_	_	_	_	_	_			_
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	278	18	0	28	20	1	2	6	22	52
	UAM Xochimilco	UAX	94	251	13	0	21	14	1	1	3	15	37
	Acolman	ACO	58	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Atizapán	ATI	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuautitlán	CUT	84	266	19	0	32	18	1	2	4	20	57
0	FES Acatlán	FAC	87	335	27	0	43	25	1	4	10	29	78
de México	La Presa	LPR	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Š	Los Laureles	LLA	47	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Montecillo	MON	83	302	14	0	29	11	1	1	2	12	43
Estado	Nezahualcóyotl	NEZ	96	318	15	0	25	15	1	2	5	17	42
ш	San Agustín	SAG	97	334	19	0	30	17	2	3	7	20	52
	Tlalnepantla	TLA	92	319	30	0	39	27	4	7	14	34	77
	Tultitlán	TLI	65	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Villa de las Flores	VIF	55	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	90	664	37	0	52	35	5	9	17	44	98

**Tabla A4.7.** Estadísticas básicas para las muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son  $\mu$ g/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

								ESTA	DÍSTICA	AS BÁS	SICAS			
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
	Merced	MER	97	Alto volumen	237	88	40	33	43	56	64	84	107	126
Distrito Federal	Pedregal	PED	93	Alto volumen	106	54	15	20	23	33	41	50	64	80
걸쬬	UAM Iztapalapa	UIZ	97	Alto volumen	165	79	33	27	39	52	57	78	96	113
ldo e	Tlalnepantla	TLA	98	Alto volumen	171	93	48	27	30	62	76	88	106	120
Estado de México	Xalostoc	XAL	97	Alto volumen	227	115	41	39	54	64	90	109	144	162

**Tabla A4.8.** Estadísticas básicas para las muestras de PM<sub>10</sub> 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 obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

							E	STADÍ	STICAS	S BÁS	SICAS	;			CUMPL	IMIENTO NOM	D DE LA
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 50 µg/m³	Cumple
_	Lomas	LOM	90	FRM 16.67 lpm	80	35	11	13	15	13	26	34	41	48	80	34.6	No
Federal	Merced	MER	93	FRM Alto Volumen	120	43	18	16	20	16	32	42	52	60	120	43.4	No
	Pedregal	PED	93	FRM 16.67 lpm	63	33	13	11	13	11	27	32	40	49	63	33.2	Si
Distrito	Secretaría de Hacienda	SHA	0	FRM 16.67 lpm	_	-	_	_	_	-	_	_	_	_	_	_	_
Δ	UAM Iztapalapa	UIZ	98	FRM Alto Volumen	87	40	13	14	18	14	30	39	48	57	87	39.9	No
•	La Presa	LPR	75	FRM Alto Volumen	93	46	12	18	20	18	35	42	55	69	93	45.6	No
9 5	Nezahualcóyotl	NEZ	92	FRM Alto Volumen	85	39	14	15	20	15	28	36	48	58	85	38.5	No
Estado de Mávico	Tlalnepantla	TLA	98	FRM Alto Volumen	90	45	19	14	18	14	36	44	54	61	90	45.5	No
<u>й</u> –	Xalostoc	XAL	98	FRM Alto Volumen	104	55	16	18	22	18	44	54	66	78	104	55.4	No

**Tabla A4.9.** Estadísticas básicas de la concentración horaria de  $PM_{10}$  reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son  $\mu g/m^3$  calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

								ESTAI	DÍSTICA	AS BÁ	SICAS			
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
	Ajusco Medio	AJM	88	TEOM (30°C)	175	32	2	19	24	12	18	28	42	57
	Benito Juárez	BJU	39	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Camarones	CAM	83	TEOM (30°C)	211	45	3	23	29	19	28	40	57	75
	Cuajimalpa	CUA	86	BETA (35°C)	174	31	1	19	24	10	17	28	41	56
<u>a</u>	Hospital General de México	HGM	83	TEOM (30°C)	264	47	2	25	32	19	28	42	60	80
eqe	Iztacalco	IZT	96	BETA (35°C)	385	35	1	20	22	15	22	32	44	59
ᅌ	Merced	MER	95	TEOM (30°C)	281	51	2	27	34	21	31	46	65	87
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	95	TEOM (30°C)	293	37	3	21	25	16	22	32	47	64
Δ	Pedregal	PED	79	TEOM (30°C)	191	39	2	23	28	14	22	34	50	69
	Santa Fe	SFE	61	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Úrsula	SUR	46	TEOM (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	67	TEOM (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	93	TEOM (30°C)	238	47	1	27	33	18	28	42	61	81
	Acolman	ACO	71	BETA (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Atizapán	ATI	66	TEOM (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Chalco	CHO	96	TEOM (35°C)	301	48	1	34	41	13	24	42	65	93
8	Cuautitlán	CUT	94	TEOM (35°C)	427	53	1	40	42	15	26	44	68	104
ěxi	FES Acatlán	FAC	94	TEOM (35°C)	230	39	1	28	34	10	19	33	53	77
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	27	TEOM (30°C)	_	-	-	_	_	_	_	_	_	_
tado	San Agustín	SAG	93	TEOM (30°C)	610	46	2	28	32	18	27	40	59	79
Ë	Tlalnepantla	TLA	69	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tultitlán	TLI	71	TEOM (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Villa de las Flores	VIF	64	TEOM (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Xalostoc	XAL	68	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_

**Tabla A4.10.** 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  $\mu g/m^3$  calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

							E	STAD	ÍSTIC.	AS B	ÁSIC	AS			 CUMPL	IMIENTO NOM	DE LA
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
eral	Coyoacán	COY	90	FRM 16.67 lpm	37	20	6	7	5	11	19	19	24	30	37	19.6	No
Fed	Merced	MER	85	FRM 16.67 lpm	40	21	7	7	3	12	21	21	24	31	40	21.4	No
٤ٟ	Pedregal	PED	88	FRM 16.67 lpm	40	19	6	7	4	9	19	19	23	27	40	18.8	No
Distrito Federal	UAM Iztapalapa	UIZ	83	FRM 16.67 lpm	35	19	5	7	5	10	18	18	23	26	35	18.8	No
o de	San Agustín	SAG	100	FRM 16.67 lpm	38	19	5	7	4	12	19	19	23	28	38	19.2	No
Estado Méxic	Tlalnepantla	TLA	92	FRM 16.67 lpm	57	23	8	8	5	13	21	21	26	32	57	22.6	No
Esta	Xalostoc	XAL	100	FRM 16.67 lpm	48	28	6	9	5	17	28	28	33	39	48	27.7	No

**Tabla A4.11.** Estadísticas básicas de la concentración horaria de  $PM_{2.5}$  reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son  $\mu g/m^3$  calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

								ESTA	DÍSTIC	AS BÁS	SICAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
	Ajusco	AJU	12	BETA (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Ajusco Medio	AJM	88	TEOM (30°C)	127	20	1	13	15	7	11	17	26	37
	Benito Juárez	BJU	39	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Camarones	CAM	83	TEOM (30°C)	190	27	1	16	19	10	16	24	35	47
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	BETA (35°C)	302	18	1	12	12	7	11	16	23	31
<u>.</u>	Coyoacán	COY	89	TEOM-FDMS (30°C)	544	27	1	19	20	9	14	23	34	49
-eder	Gustavo A. Madero	GAM	8	TEOM-FDMS (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Distrito Federal	Hospital General de México	HGM	83	TEOM (30°C)	241	27	1	18	21	9	15	24	36	50
۵	Merced	MER	95	TEOM (30°C)	177	28	1	18	20	9	16	25	36	50
	Miguel Hidalgo	MGH	95	TEOM (30°C)	267	24	1	16	16	9	14	21	30	42
	Pedregal	PED	79	TEOM (30°C)	149	21	1	15	17	6	11	19	28	39
	San Juan de Aragón	SJA	64	BETA (35°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Santa Fe	SFE	61	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	93	TEOM (30°C)	193	26	1	18	20	8	14	23	34	48
	UAM Xochimilco	UAX	94	BETA (35°C)	171	20	1	13	14	7	11	18	25	34

**Tabla A4.11 (continuación).** Estadísticas básicas de la concentración horaria de  $PM_{2.5}$  reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son  $\mu g/m^3$  calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que obtuvieron al menos el 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

								ESTA	DÍSTICA	AS BÁS	ICAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
xico	Investigaciones Nucleares	INN	27	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Š	Nezahualcóyotl	NEZ	96	BETA (35°C)	267	20	1	15	15	7	11	18	26	36
o de	San Agustín	SAG	93	TEOM (30°C)	185	24	1	16	18	7	13	21	31	43
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	69	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
й	Xalostoc	XAL	68	TEOM (30°C)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_

**Tabla A4.12.** Estadísticas básicas para la concentración de plomo presente en muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son μg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que reportaron al menos tres trimestres con al menos 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

								ESTA	DÍSTICA	AS BÁS	ICAS				CUMPLII DE LA	_
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/m³	Cumple
9 . E	Merced	MER	93	4	0.105	0.035	0.0096	0.017	0.021	0.012	0.022	0.034	0.043	0.050	0.045	Si
Distrito Federal	Pedregal	PED	85	4	0.044	0.017	0.0003	0.012	0.017	0.006	0.008	0.011	0.025	0.035	0.019	Si
2 12	UAM Iztapalapa	UIZ	98	4	0.065	0.031	0.0007	0.015	0.019	0.012	0.022	0.032	0.041	0.047	0.039	Si
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	98	4	0.085	0.037	0.0073	0.017	0.022	0.014	0.026	0.036	0.048	0.057	0.046	Si
Esta d Méy	Xalostoc	XAL	93	4	0.243	0.055	0.0097	0.044	0.030	0.026	0.033	0.043	0.063	0.095	0.088	Si

**Tabla A4.13.** Estadísticas básicas para la concentración de plomo presente en muestras de  $PM_{10}$ , las unidades de concentración son  $\mu g/m^3$  calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que reportaron al menos tres trimestres con al menos 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

								EST	TADÍSTIC	AS BÁSI	CAS			
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
rito	Merced	MER	90	4	0.047	0.020	0.0057	0.013	0.022	0.006	0.009	0.012	0.031	0.038
Distrito Federal	UAM Iztapalapa	UIZ	97	4	0.054	0.021	0.0042	0.013	0.022	0.007	0.010	0.021	0.032	0.039
	La Presa	LPR	98	4	0.090	0.026	0.0006	0.020	0.031	0.006	0.009	0.024	0.040	0.051
/éxi	Nezahualcóyotl	NEZ	90	4	0.086	0.019	0.0028	0.017	0.013	0.006	0.009	0.013	0.022	0.041
و ∠ مو	Tlalnepantla	TLA	98	4	0.049	0.025	0.0023	0.012	0.021	0.008	0.013	0.026	0.034	0.040
Estado de México	Xalostoc	XAL	93	4	0.211	0.040	0.0001	0.044	0.036	0.006	0.010	0.032	0.046	0.076

**Tabla A4.14.** Estadísticas básicas para temperatura ambiente, todas las unidades están en °C. Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							EST	ADÍSTIC	AS BÁSIC	CAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
	Ajusco	AJU	71	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Ajusco Medio	AJM	94	26.3	15.8	5.3	3.3	4.4	12.0	13.6	15.5	18.0	21.8
	Benito Juárez	BJU	41	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuajimalpa	CUA	87	26.5	14.0	3.8	3.6	4.9	9.9	11.6	13.4	16.5	20.6
	Gustavo A. Madero	GAM	8	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
<del>-</del>	Hospital General de México	HGM	69	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Distrito Federal	Merced	MER	74	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
o Fe	Miguel Hidalgo	MGH	89	29.3	17.7	7.5	3.8	5.4	13.4	15.0	17.0	20.4	24.5
striţ	Pedregal	PED	99	28.5	16.9	4.5	4.3	5.9	11.6	14.1	16.4	20.0	24.2
۵	Santa Fe	SFE	99	25.5	15.0	4.0	3.7	5.2	10.6	12.5	14.5	17.7	21.4
	Santa Úrsula	SUR	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	95	29.8	17.0	4.2	4.5	6.4	11.4	13.9	16.4	20.3	24.7
	Tlalpan	TPN	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	75	29.3	17.8	8.0	3.7	5.4	13.7	15.1	17.1	20.5	24.5
	UAM Xochimilco	UAX	64	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Acolman	ACO	96	30.1	16.6	-0.4	5.2	7.2	9.9	13.2	16.3	20.4	25.1
	Chalco	CHO	100	29.4	16.3	1.3	4.7	6.5	10.4	13.2	15.9	19.7	24.0
	Cuautitlán	CUT	96	29.0	14.8	-3.1	5.5	7.9	7.8	11.1	14.5	19.0	23.6
<u>8</u>	FES Acatlán	FAC	93	32.0	17.3	3.4	5.5	8.1	10.6	13.3	16.4	21.4	26.9
Μéχ	Investigaciones Nucleares	INN	21	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
<del>de</del> –	Montecillo	MON	73	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Estado de México	Nezahualcóyotl	NEZ	90	27.9	16.8	4.0	3.9	5.5	12.2	14.1	16.2	19.6	23.5
Est	San Agustín	SAG	99	29.9	18.0	5.5	4.3	5.8	12.8	15.2	17.5	21.0	25.6
	Tlalnepantla	TLA	92	28.0	17.0	5.5	4.1	6.0	12.0	14.1	16.4	20.1	24.2
	Villa de las Flores	VIF	92	28.6	16.5	1.2	4.8	6.3	10.3	13.5	16.0	19.8	24.6
	Xalostoc	XAL	90	28.0	17.2	4.3	3.8	5.3	12.7	14.6	16.8	19.9	24.0

**Tabla A4.15.** Estadísticas básicas para humedad relativa, todas las unidades están en %. Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							EST	ADÍSTICA	AS BÁSIO	CAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
	Ajusco	AJU	68		_	_	_	_	_	_	_	_	
	Ajusco Medio	AJM	93	99	61	9	18	29	36	48	63	77	88
	Benito Juárez	BJU	41	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuajimalpa	CUA	98	100	66	7	19	30	37	52	68	82	92
	Gustavo A. Madero	GAM	8	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
-	Hospital General de México	HGM	69	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Distrito Federal	Merced	MER	91	98	59	4	20	32	30	43	60	75	88
5 Fe	Miguel Hidalgo	MGH	89	94	60	5	19	32	32	44	62	76	87
îţ.	Pedregal	PED	99	100	60	5	20	32	31	44	62	76	90
ä	Santa Fe	SFE	99	100	65	8	19	30	37	51	68	81	91
	Santa Úrsula	SUR	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	91	100	63	7	18	30	36	48	65	78	89
	Tlalpan	TPN	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	74	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Xochimilco	UAX	70	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Acolman	ACO	96	100	67	2	22	34	34	51	71	85	95
	Chalco	CHO	99	98	64	2	19	29	36	50	66	79	91
	Cuautitlán	CUT	94	99	70	5	23	39	36	52	76	91	97
8	FES Acatlán	FAC	93	100	62	5	23	39	29	42	65	81	94
/éxi	Investigaciones Nucleares	INN	18	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
g e	Montecillo	MON	73	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Estado de México	Nezahualcóyotl	NEZ	90	95	58	5	18	29	31	44	60	73	83
Estí	San Agustín	SAG	99	100	61	6	20	32	33	45	64	77	89
	Tlalnepantla	TLA	92	88	55	8	18	30	29	40	57	70	81
	Villa de las Flores	VIF	84	100	62	4	22	36	31	44	65	80	92
	Xalostoc	XAL	90	90	54	6	18	28	29	40	55	68	80

**Tabla A4.16.** Estadísticas básicas para velocidad de viento, todas las unidades están en m/s. Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							ESTA	DÍSTIC	AS BÁS	SICAS				-	
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*
	Ajusco	AJU	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Ajusco Medio	AJM	86	11.9	2.6	0.5	1.5	1.6	1.1	1.6	2.2	3.2	5.5	0.2	NO
	Benito Juárez	BJU	40	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Cuajimalpa	CUA	97	6.6	2.0	0.5	0.9	1.2	1.0	1.3	1.9	2.5	3.7	0.2	NNO
	Gustavo A. Madero	GAM	8	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
ral	Hospital General de México	HGM	63	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
ede:	Merced	MER	91	7.3	2.1	0.5	1.1	1.4	1.0	1.3	1.9	2.7	4.2	0.5	Ν
Distrito Federal	Miguel Hidalgo	MGH	98	8.6	1.9	0.5	0.9	1.2	0.8	1.2	1.7	2.4	3.4	2.0	NNO
Sistr	Pedregal	PED	99	7.7	1.9	0.5	0.9	1.0	0.9	1.3	1.7	2.3	3.8	0.7	NNO
Ц	Santa Fe	SFE	95	8.0	2.3	0.5	1.0	1.2	1.2	1.6	2.1	2.8	4.2	0.3	NO
	Santa Úrsula	SUR	48	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Tláhuac	TAH	95	8.4	2.1	0.5	1.2	1.5	0.9	1.2	1.8	2.7	4.5	0.0	0
	Tlalpan	TPN	14	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	UAM Iztapalapa	UIZ	75	7.3	2.0	0.5	0.7	0.8	1.3	1.5	1.9	2.3	3.3	0.0	NE
	UAM Xochimilco	UAX	70	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	Acolman	ACO	96	9.2	2.4	0.5	1.4	1.6	1.1	1.4	1.9	3.0	5.2	0.2	NNE
	Chalco	CHO	100	6.6	2.0	0.5	1.3	1.8	0.7	1.0	1.6	2.8	4.5	1.8	SE
	Cuautitlán	CUT	92	7.0	1.6	0.5	8.0	1.3	0.6	0.8	1.5	2.1	3.2	11.6	Ν
8	FES Acatlán	FAC	85	5.8	1.7	0.5	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3.4	0.4	NO
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	21	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
o de	Montecillo	MON	73	_		_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
tado	Nezahualcóyotl	NEZ	90	7.9	2.5	0.5	1.4	1.8	1.1	1.5	2.2	3.3	5.2	0.8	NE
Ë	San Agustín	SAG	99	6.8	1.7	0.5	0.9	1.1	8.0	1.1	1.6	2.2	3.4	2.2	NNE
	Tlalnepantla	TLA	92	6.8	2.2	0.5	1.1	1.6	0.9	1.3	2.0	2.9	4.3	2.6	NNO
	Villa de las Flores	VIF	92	6.6	1.9	0.5	1.1	1.4	8.0	1.1	1.6	2.5	4.2	0.9	Ν
	Xalostoc	XAL	90	11.5	2.7	0.5	1.9	2.4	0.9	1.3	2.1	3.7	6.9	3.8	NNE

<sup>\*</sup> La dirección predominante corresponde al vector resultante de la suma vectorial de los datos horarios.

**Tabla A4.17.** Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta A, todas las unidades están en W/m². Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

				Accentail   1.91   1.48   1.91   1.64   1.											
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil		Percentil 25			Percentil 90		
o =	Merced	MER	97	6.18	1.91	0.001	1.48	2.73	0.09	0.44	1.64	3.17	4.22		
Distrito Federal	Pedregal	PED	100	6.04	1.87	0.001	1.52	2.83	0.04	0.35	1.56	3.18	4.31		
Ę Ł	Santa Fe	SFE	99	7.83	2.39	0.001	1.88	3.49	0.09	0.52	2.03	4.01	5.40		
de o	Montecillo	MON	15	_	_	_	_	_	_	_	_	_			
Estado d México	San Agustín	SAG	99	5.98	2.07	0.001	1.63	3.06	0.07	0.43	1.78	3.49	4.64		
Esta	Tlalnepantla	TLA	98	5.69	1.80	0.001	1.41	2.53	0.07	0.41	1.54	2.93	4.02		

**Tabla A4.18.** Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta B, todas las unidades están en W/m². Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de datos válidos se utilizaron en el informe anual.

							EST	TADÍSTIC	AS BÁSIC	CAS			
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
0 16	Merced	MER	97	0.304	0.080	0.001	0.065	0.125	0.002	0.011	0.058	0.136	0.194
Distrito Federal	Pedregal	PED	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Ę Ę	Santa Fe	SFE	99	0.334	0.085	0.001	0.069	0.129	0.002	0.013	0.061	0.142	0.207
de	Montecillo	MON	15	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Estado d México	San Agustín	SAG	99	0.278	0.081	0.001	0.065	0.126	0.002	0.012	0.062	0.138	0.196
Esta	Tlalnepantla	TLA	98	0.320	0.084	0.001	0.066	0.125	0.003	0.014	0.065	0.139	0.198

**Tabla A4.19.** Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo. Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

			PP		рН		A	NIONE	S			CATIO	ONES		
Entidad	Estación	Clave	Precipitación pluvial total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje de eventos de lluvia ácida (%)	NO₃ depósito total (kg/ha)	SO <sub>4</sub> -² depósito total (kg/ha)	Cl <sup>-</sup> depósito Total (kg/ha)	NH₄⁺depósito Total (kg/ha)	Ca²+ depósito Total (kg/ha)	K⁺ depósito Total (kg/ha)	H⁺ depósito Total (kg/ha)	Mg²+ depósito Total (kg/ha)	Na+ depósito Total (kg/ha)
	Ajusco	AJU	868	4.1	4.8	62	17.36	22.38	3.06	9.38	3.23	0.68	0.12	0.44	0.90
	Cerro del Tepeyac	TEC	627	4.5	5.1	30	18.05	23.74	2.53	11.93	4.98	1.16	0.05	0.29	0.62
	Corena	COR	384	3.9	4.7	40	9.22	13.72	2.01	6.16	2.20	0.41	0.07	0.19	0.38
	Diconsa	DIC	653	4.5	4.9	42	23.86	24.80	2.53	12.10	5.16	0.82	0.08	0.30	0.81
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	731	4.1	4.8	47	24.25	27.80	3.42	12.06	5.64	0.55	0.11	0.29	1.79
deral	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	882	4.2	4.7	65	25.26	28.40	3.13	11.38	6.10	0.66	0.16	0.41	1.14
Distrito Federal	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	615	4.0	5.1	39	22.56	26.56	2.61	11.36	6.74	0.53	0.05	0.31	0.70
Dis	Legaria	IBM	647	4.3	4.7	36	26.61	33.23	3.30	13.73	8.14	0.57	0.12	0.38	0.85
	Lomas	LOM	844	4.1	4.7	55	28.46	32.55	3.51	13.73	6.97	0.87	0.17	0.50	1.04
	Milpa Alta	MPA	573	4.1	4.7	54	13.34	19.35	3.01	8.04	2.97	0.47	0.12	0.26	0.67
	Museo de la Ciudad de México	MCM	595	4.4	5.1	26	22.60	26.86	2.81	13.72	6.46	1.17	0.05	0.39	0.79
	San Nicolás Totolapan	SNT	629	4.6	5.3	53	15.52	18.52	1.85	8.36	3.59	1.12	0.03	0.40	0.61
dico	Montecillo	MON	566	4.3	4.8	39	13.44	18.21	2.74	8.38	2.98	0.39	0.10	0.28	0.45
Μę	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	364	4.4	5.2	18	13.05	18.15	2.33	8.92	3.99	1.07	0.02	0.26	0.80
o de	Tlalnepantla	TLA	658	4.5	4.9	39	19.80	25.94	2.67	9.21	5.71	0.64	0.08	0.29	2.94
Estado de México	Xalostoc	XAL	481	4.4	4.9	30	15.28	21.12	2.39	8.73	4.81	0.49	0.06	0.33	0.90

**Tabla A4.20.** 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.

				OZON	10		PM <sub>10</sub>	)		PM <sub>2</sub> .	5	Tc	tal
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
	Ajusco	AJU	88	23	77				12	0	100	23	77
	Ajusco Medio	AJM	95	40	60	93	2	98	93	3	97	42	58
	Benito Juárez	BJU	40	27	73	42	10	90	42	13	88	35	65
	Camarones	CAM	92	21	79	86	5	95	86	5	95	24	76
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	95	34	66	_	_	_	95	2	98	35	65
	Coyoacán	COY	90	29	71	_	_	_	94	11	89	34	66
	Cuajimalpa	CUA	95	35	65	88	1	99	_	_	_	36	64
	Gustavo A. Madero	GAM	8	29	71	_	_	_	8	68	32	68	32
eral	Hospital General de México	HGM	90	16	84	85	10	90	85	8	92	24	76
Distrito Federal	Iztacalco	IZT	93	29	71	98	2	98	_	_	_	29	71
ڹؚ	Merced	MER	98	22	78	99	15	85	99	9	91	33	67
Oist	Miguel Hidalgo	MGH	96	30	70	99	2	98	99	6	94	33	68
_	Pedregal	PED	95	40	60	84	4	96	84	3	97	41	59
	San Juan de Aragón	SJA	66	33	67	_	_	_	66	1	99	34	66
	Santa Fe	SFE	65	44	56	65	0	100	65	1	99	44	56
	Santa Úrsula	SUR	33	34	66	48	2	98	_	_	_	25	75
	Tláhuac	TAH	64	26	74	72	4	96	_	_	_	27	73
	Tlalpan	TPN	48	34	66	_	_	_	_	_	_	34	66
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	29	71	96	11	89	96	9	91	35	65
	UAM Xochimilco	UAX	99	37	63	_	_	_	98	3	97	39	61
	Acolman	ACO	63	8	92	73	3	97	0	0	0	9	91
	Atizapán	ATI	66	20	80	68	2	98	_	_	_	19	81
	Chalco	CHO	86	10	90	100	20	80	_	_	_	26	74
	Cuautitlán	CUT	96	1	99	98	27	73	_	_	_	27	73
	FES Acatlán	FAC	95	21	79	98	4	96	_	_	_	23	77
8	Investigaciones Nucleares	INN	32	8	92	30	0	100	30	0	100	7	93
Méx	La Presa	LPR	66	3	97	_	_	_	_	_	_	3	97
Estado de México	Los Laureles	LLA	92	8	92	_	_	_	_	_	_	8	92
ado	Montecillo	MON	63	3	97	_	_	_	_	_	_	3	97
Est	Nezahualcóyotl	NEZ	98	20	80	_	_	_	99	3	97	23	77
	San Agustín	SAG	98	12	88	96	12	88	96	5	95	21	79
	Tlalnepantla	TLA	97	15	85	72	17	83	72	9	91	25	75
	Tultitlán	TLI	66	9	91	73	17	83	_	_	_	23	77
	Villa de las Flores	VIF	56	8	92	66	32	68	_	_	_	36	64
	Xalostoc	XAL	95	0	100	69	46	54	69	17	83	33	67
	Distrito Federal		100	55	45	100	17	83	100	16	84	64	36
Total	Estado de México		100	38	62	100	50	50	100	14	86	65	35
ř	Zona metropolitana		100	58	42	100	50	50	100	21	79	78	22

# Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Tabla A5.1. Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México entre 2001 y 2015.

		Acti	vación	Desactivación		
Año	Contaminante	Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	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 l
	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	PM <sub>10</sub>	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
	PM <sub>10</sub>	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó la Fase I
2004	_	_	_	_	_	_
2005	_	_	_	_	_	_
2006	PM <sub>10</sub>	01-ene 09:00	VIF	169	02-ene 03:00	18 h
	PM <sub>10</sub>	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

**Tabla A5.1 (continuación).** Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México entre 2001 y 2015.

		Acti	vación	Desactivación		
Año	Contaminante	Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
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
	PM <sub>10</sub>	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	PM <sub>10</sub>	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
	PM <sub>10</sub>	25-dic 11:00	VIF	152	26-dic 10:00	23 h
2013	PM <sub>10</sub>	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	157 154 156	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
	PM <sub>10</sub>	25-dic 08:00	VIF	151	26-dic 12:00	28 h

**Tabla A5.2.** Activación de la Fase de Contingencia en la Ciudad de México entre 2001 y 2015.

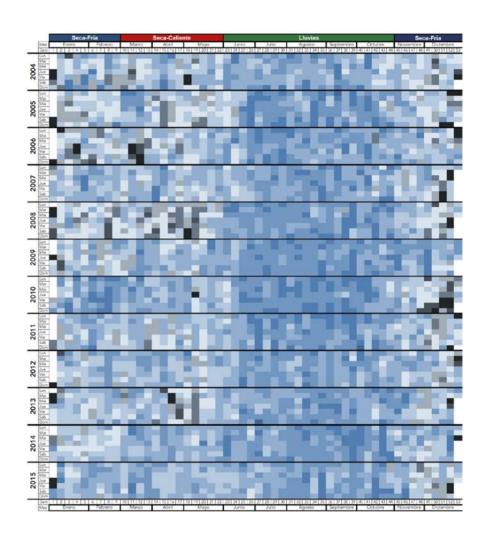
		Acti	ivación			Desactiv	ación
Año	Contaminante	Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fase	Fecha y hora	Duración
2001	_	_	_	_	_	_	_
2002	Ozono	18-sep 16:00	PED	242	Fase I	19-sep 16:00	24 h
2003	PM <sub>10</sub>	25-dic 12:00	XAL	176	Fase I, Regional	26-dic 12:00	24 h
2004	_	_	_	_	_	_	_
2005	PM <sub>10</sub>	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	_	_	_	_	_	_	_

#### Mosaicos

# Partículas menores a 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>)

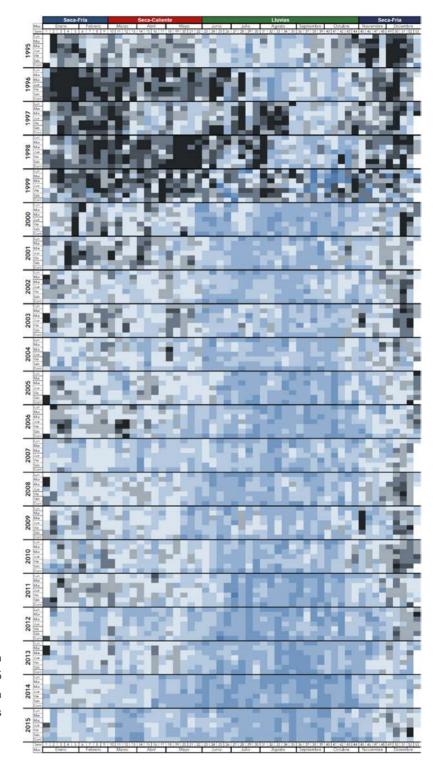
-					
LEYENDA					
Concentración	Color				
0 - 10 μg/m³					
11 - 20 μg/m³					
21 - 30 μg/m³					
31 - 40 µg/m³					
41 - 50 μg/m³					
51 - 60 μg/m³					
61 - 70 μg/m³					
71 - 80 µg/m³					
81 - 90 μg/m³					
$> 90  \mu g/m^3$					

**Figura A6.1.** Mosaico de PM<sub>2.5</sub>, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 2004 y 2015. El color de la celda indica la concentración de PM<sub>2.5</sub> de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.



# Partículas menores a 10 µm (PM<sub>10</sub>)

LEYENDA					
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					
$> 200  \mu g/m^3$					



**Figura A6.2.** Mosaico de PM<sub>10</sub>, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1995 y 2015. El color de la celda indica la concentración de PM<sub>10</sub> de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

#### Ozono

LEYENDA					
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 A6.3.** Mosaico de ozono, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1986 y 2015. El color de la celda indica la concentración del ozono de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

